

Prerequisites of the engineering of bionic technical tools for soil processing

A. Kobets¹ | E. Aliiev^{1,2} | H. Tesliuk¹ | O. Zolotovska¹

Article info

Correspondence Author

A. Kobets

E-mail:

alonaz197@ukr.net

¹ Dnipro State Agrarian and Economic University, Serhii Efremov Str., 25, Dnipro, 49600 Ukraine

² Institute of Oilseed Crops NAAS, Instytutska Str., 1, v. Soniachne, Zaporizhzhia District, Zaporizhzhia Region, 69093, Ukraine

Citation: Kobets, A., Aliiev, E., Tesliuk, H., & Zolotovska, O. (2024). Prerequisites of the engineering of bionic technical tools for soil processing. *Scientific Progress & Innovations*, 27 (4), 187–199. doi: 10.31210/spi2024.27.04.32

The development of soil moisture storage and retention systems is hampered by high energy consumption, low economic efficiency and significant moisture losses, as well as other disadvantages associated with the use of tillage equipment. The purpose of the research is to analyze the existing bionic tillage working bodies and the processes of their interaction with the soil, which will make it possible to develop methods for designing bionic technical means of tillage. The given analysis of the morphological properties of soil and water fauna emphasizes the relevance of using the shape of their body and the surface of the cover in the design of working bodies of technical means of soil cultivation. The use of such bionic working bodies makes it possible to reduce the adhesion of the soil and its resistance to the flow around the working body, while ensuring effective cutting of the soil environment. The analysis of research on bionic tillage working bodies showed a wide range of application of morphological properties of soil and water fauna for various types of technical means of tillage. However, the presented studies lack a generalised methodology that would take into account modern modelling methods based on CAD/CAE systems, the use of advanced engineering software to analyse the results of experimental studies, and bionic design principles. Therefore, based on our own experience of numerical modeling, analysis of animal locomotion and morphology, and processing of the results of experimental studies, the method of designing tillage tools, which is called "Engineering of bionic technical means of tillage", was added. The presented method of designing tillage tools contains 5 blocks: technological requirements, bionic design principles, numerical modeling, experimental studies, production tests. Further research will be aimed at determining the specific laws and relationships of the morphology and locomotion of animals of soil and water fauna from the design of working bodies of technical means of soil cultivation and their interaction with the soil environment.

Keywords: soil, working organs, bionics, engineering, design, analysis, methodology.

Передумови інжинірингу біонічних технічних засобів обробітку ґрунту

A. С. Кобець¹ | Е. Б. Алієв^{1,2} | Г. В. Теслюк¹ | О. В. Золотовська¹

¹ Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна

² Інститут олійних культур Національної академії аграрних наук України, с. Сонячне, Запорізька обл., Україна

Розвиток систем зберігання та утримання вологи в ґрунті стримується через високе енергоспоживання, низьку економічну ефективність і значні втрати вологи, а також інші недоліки, пов'язані з використанням ґрунтообробного обладнання. Отже, важливо розробити ефективні та енергоощадні біонічні знаряддя для обробки ґрунту, які відповідатимуть сучасним вимогам аграрного сектору. Тому метою проведеного огляду літературних джерел було здійснення глибокого аналізу існуючих біонічних ґрунтообробних робочих органів і процесів їх взаємодії з ґрунтом, який дасть змогу розробки методу проектування біонічних технічних засобів обробітку ґрунту. Приведений аналіз морфологічних властивостей ґрунтової і водної фауни підкреслює актуальність застосування форми їх тіла і поверхні покриву при проектуванні робочих органів технічних засобів обробітку ґрунту. Використання таких біонічних робочих органів дозволяють знизити адгезію ґрунту і його опір на обтікання робочого органу, забезпечуючи при цьому ефективне прорізання ґрунтового середовища. Аналіз досліджень біонічних ґрунтообробних робочих органів показав великий спектр застосування морфологічних властивостей ґрунтової і водної фауни для різних видів технічних засобів обробітку ґрунту. Однак, у представлених дослідженнях відсутня узагальнена методика, яка б врахувала сучасні методи моделювання на основі CAD/CAE-систем, використання передових інженерних програм для аналізу результатів експериментальних досліджень, а також біонічних принципів проектування. Тому спираючись на власному досвіді чисельного моделювання, аналізу локомоції та морфології тварин і обробки результатів експериментальних досліджень доповнено методу проектування ґрунтообробних знарядь, яка має назву «Інжиніринг біонічних технічних засобів обробітку ґрунту». Представлена методика проектування ґрунтообробних знарядь містить 5 блоків: технологічні вимоги, біонічні принципи проектування, чисельне моделювання, експериментальні дослідження, виробничі випробування. Подальші дослідження будуть спрямовані на визначення конкретних закономірностей і взаємозв'язків морфології і локомоції тварин ґрунтової і водної фауни із проектування робочих органів технічних засобів обробітку ґрунту та їх взаємодії із ґрунтовым середовищем.

Ключові слова: ґрунт, робочі органи, біоніка, інжиніринг, проектування, аналіз, методика.

Бібліографічний опис для цитування: Кобець А. С., Алієв Е. Б., Теслюк Г. В., Золотовська О. В. Передумови інжинірингу біонічних технічних засобів обробітку ґрунту. *Scientific Progress & Innovations*. 2024. № 27 (4). С. 187–199.

Сільське господарство, як одна з рушійних сил людського розвитку, є основою для підтримки соціальної стабільності. Аграрне машинобудування завжди було важливою галуззю досліджень, і різні технології постійно просувалися та застосовувалися в ній [1]. Біонічна технологія з унікальною інженерною думкою позитивно впливає на розвиток агротехніки. Народження біоніки відкрило нову еру навчання людини у природи [2]. Біоніка – це вивчення структури, властивостей, принципів, поведінки та взаємодії біологічних систем з метою створення нових ідей дизайну, принципів роботи та складу систем для інженерних технологій [3]. Поки що не існує уніфікованого та чіткого визначення біоніки в строгому сенсі, але її основна конотація зрозуміла: біоніка вдосконалює сучасне технічне обладнання та створює нові технології шляхом вивчення та імітації різних характеристик біологічного світу [4].

Імітуючи характеристики та рухи різних істот, біоніка є важливою формою навчання людини у природи. Біонічна технологія може бути застосована до оптимізованої сільськогосподарської техніки та обладнання, що значно покращить ефективність роботи сільськогосподарського виробництва [5–7].

У галузі аграрного машинобудування взаємодія між ґрунтом і технікою є однією з основних проблемних питань. У процесі контакту ґрунтообробних знарядь із ґрунтом створюється великий опір і відповідно збільшується споживання енергії. В свою чергу біоніка, яка базується на ґрунтовій і водній фаунах, дає змогу зменшити опір за рахунок обтікаючих форм і поверхонь з антиадгезійними властивостями [8–11].

Тому важливо розробити високоефективні та енергозберігаючі біонічні ґрунтообробні знаряддя, які б відповідали вимогам сучасного сільського господарства щодо зниження опору обробці та зчеплення ґрунту. Зчеплення з ґрунтом спричиняє підвищення робочого опору під час роботи ґрунтозачепних компонентів, що призводить до збільшення енерговитрат, погіршення експлуатаційних якостей, значної втрати вологи ґрунтом і навіть механічних пошкоджень.

Популяризація систем зберігання та збереження вологи у ґрунті обмежується високим споживанням енергії, недостатньою економічною ефективністю та значною втратою вологи ґрунтом, наряду з іншими негативними факторами, що стосуються ґрунтообробного обладнання [12–14]. Під час роботи традиційного сільськогосподарського знаряддя для обробки ґрунту споживання енергії на подолання опору ковзанню між ґрунтом і поверхнею знаряддя становить 40–70 % від загального споживання енергії через адгезію ґрунту і тертя [15, 16].

Багато вчених розглядали механізми і будували відповідні фізико-математичні моделі процесу ковзання ґрунту по матеріалу знаряддя, який включає тертя та адгезію [17–19]. Ці технології важко застосувати в механічному обладнанні через низьку стійкість до стирання, високу вартість, складну роботу, нестабільну техніку або складність ремонту.

У природі явища зчеплення з ґрунтом майже відсутні у тварин ґрунтової фауни при пересуванні їх

в ґрунті. Із розвитком біоніки дослідники помітили, що тварини ґрунтової фауни, такі як жук-гноювик, жужелиця, кротовий цвіркун, миш, панголін тощо, мають функції запобігання адгезії або зменшення опору протягом тривалого часу [20–24]. Такі відмінні здібності тварин ґрунтової фауни щодо антиадгезії або зниження опору частково є наслідком їхньої негладкої морфології поверхні [25].

Біоміметичні дослідження показують, що істоти досягають чудових функціональних здібностей, адаптуючись до свого середовища проживання шляхом тривалої еволюції [26]. Деякі тварини, які постійно живуть у ґрунтовому середовищі, виробили різні режими діяльності, щоб адаптуватися до різних умов ґрунтового середовища. Тим часом у цих тварин поступово розвинулися додатки з оптимізованою морфологією та чудовими механічними властивостями для зменшення опору різанню під час копання. Це забезпечує основу для біонічних досліджень щодо оптимізації геометричної структури та механічних властивостей ґрунтообробних знарядь [23, 27].

Аналізом літературних джерел [28, 43, 51] встановлено, що з точки зору гідродинаміки тіло тварин водної фауни (риб, ссавців тощо) – самі раціональні природні конструкції [8, 10]. Використання форми тіла тварин водної фауни дозволяють знизити опір на обтікання робочого органу, забезпечуючи при цьому ефективне прорізання середовища.

Приведений аналіз літературних джерел підкреслює актуальність використання морфологічних властивостей ґрунтової і водної фауни при проектуванні ґрунтообробних знарядь.

В дослідженнях [29] представлено аналіз способів зменшення опору конструкційних елементів за допомогою різних рішень для інженерії поверхні. Поточні дослідження в основному зосереджені на останніх досягненнях у трибологічній поведінці біоінспірованих поверхонь і матеріалів. Також показано, що імітація біологічних поверхонь призвела до значного зниження рівня тертя та опору, сприяючи розробці протизносних і антиадгезійних поверхонь.

В роботі [30] з метою покращення робочих характеристик збиральної машини маніоки було проведено структурне біонічне проектування її копальної лопати. Взявши лапи східного цвіркуна як біонічний прототип, було створено новий метод структурного біонічного проектування лопати для копання (*рис. 1*). Було запропоновано комплексний метод порівняння продуктивності, який використовується для вибору схем біонічного проектування. Дослідження показали, що метод біонічного дизайну може не тільки покращити загальні механічні властивості копальної лопати, але також може допомогти покращити ефект збирання маніоки, що дає нову ідею для структурної оптимізації конструкції машин для збирання врожаю.

У дослідженні [31] запропоновано спосіб розпушування ґрунту примусовою вібрацією для зменшення опору та енерговитрати. Біонічними прототипами негладких робочих органів глибокорихлювача в цьому дослідженні були мурашиний лев і панголін (*рис. 2*). Аналогічні дослідження

представлені в статті [32], де використані багатокутні геометричні структури луски панголіна. Результати показали, що поєднання високочастотної вібрації та негладких поверхонь сприяло зниженню когезії ґрунту, зменшенню кута внутрішнього тертя в ґрунті, руйнуванню шару водяної плівки на поверхні контакту із ґрунтом.

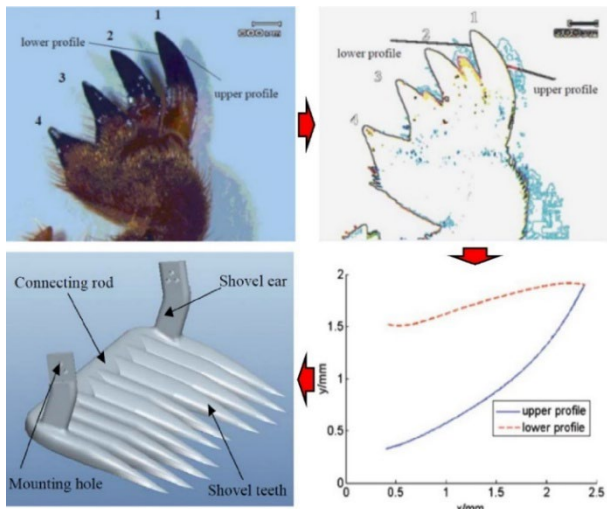


Рис. 1. Біонічне проектування робочого органу збиральної машини маніюки на основі лапи східного цвіркуна
Джерело: [2].

У дослідженні [33] біонічну комбіновану ґрунто-обробну машину для глибокого розпушування стерні було розроблено за допомогою біонічного аналізу. Базуючись на унікальній моделі кусання ротових апаратів сарани на підщепках кукурудзи,

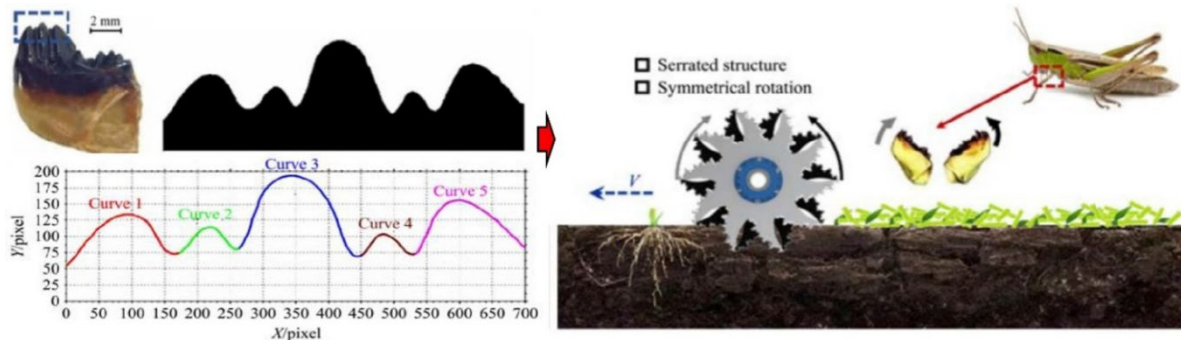


Рис. 3. Конструкція робочого органу глибокого розпушування стерні з використанням унікальної моделі ротових апаратів сарани
Джерело: [4].

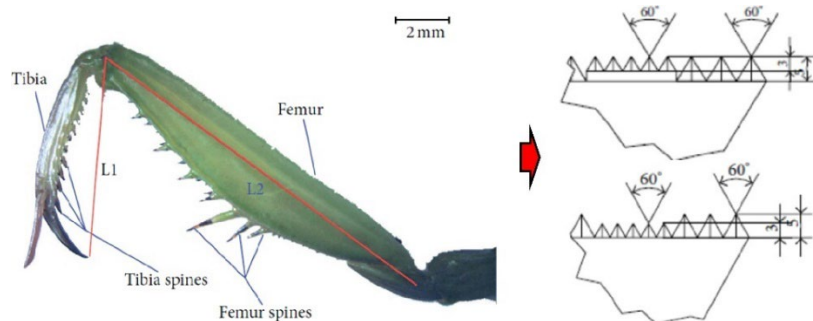


Рис. 4. Конструкція біонічного леза із профілем та розташуванням шипів передньої кінцівки богомола
Джерело: [5].

біонічний пристрій для руйнування стерні отримав нову багатосегментну зубчасту біонічну структуру (рис. 3) та симетричний обертальний рух, що могло значно збільшити швидкість руйнування стерні і зменшити опір до лущення стерні.

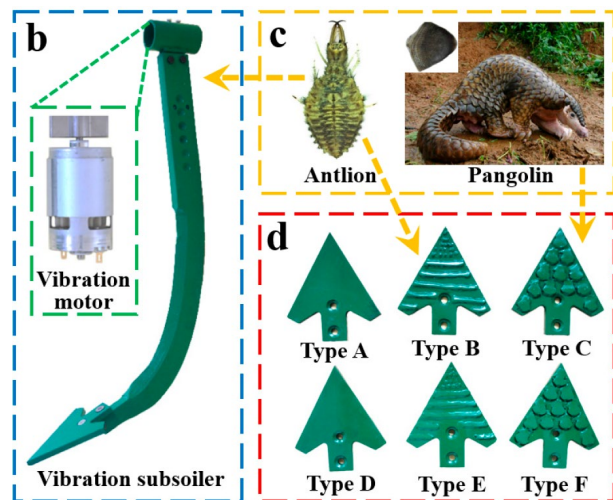


Рис. 2. Конструкція глибокорозпушувачів з вібраційним електронним двигуном:

b – вібруючий робочий орган глибокорозпушувача; c – біонічні прототипи; d – робочі органи глибокорозпушувача
Джерело: [2].

В статті [34] виходячи з профілю та розташування шипів передньої кінцівки богомола, а саме великогомілкової частини, були розроблені ріжучі леза з відповідним профілем зубів (рис. 4). За результатами чисельного моделювання і експериментів встановлено, що біонічні леза із зазубреними краями продемонстрували кращу ефективність різання.

У статті [35] наведено методи та результати моделювання в сільськогосподарській біомеханіці, що дозволило обґрунтувати адаптовані до ґрунтового середовища моделі робочих органів культиватора на основі поворотних дисків із зубами. Біологічним прототипом цієї конструкції є риуча кінцівка

жука-носорога (рис. 5). Застосування нового типу робочих органів – зубчастого плоского диска, сконструйованого за біонічною манерою, підвищить ефективність боротьби з бур'янами під час міжрядного обробітку ґрунту, а також зменшить тяговий опір.

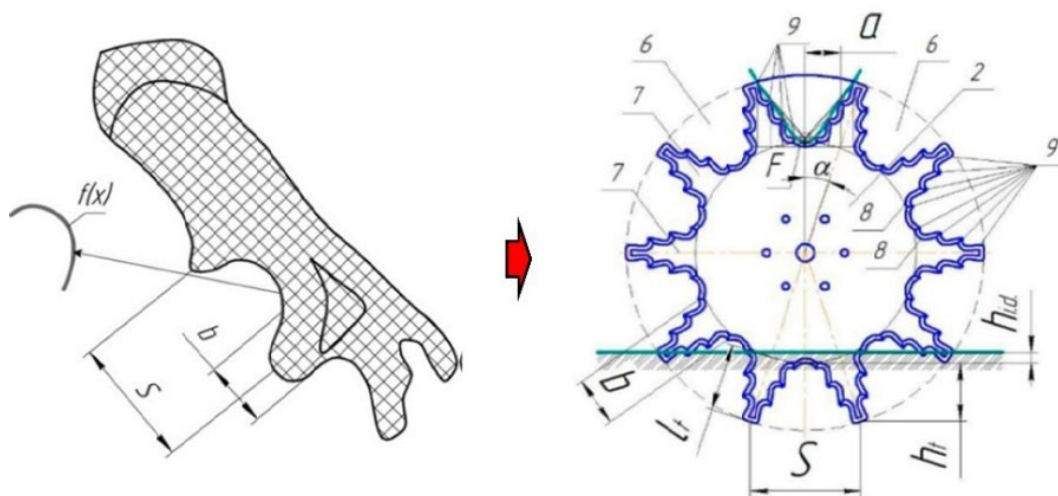


Рис. 5. Конструкція робочих органів культиватора на основі поворотних дисків із зубами на основі кінцівки жука-носорога
Джерело: [7].

У статті [36] наведено методи та результати застосування біонічного підходу в системі агро-механіки, що дозволило теоретично обґрунтувати основні параметри моделі робочих органів хвилястих дисків за двома біонічними прототипами (рис. 6) – риучою ніжкою та радіальними ребрами дисків двостулкової раковина їстівного серцеподібного моллюска (*Cerastoderma edule*) і риуча нога жука-

гнойовика звичайного (*Geotrupes stercorarius*). Модель робочих органів хвилеподібних дисків дозволяє зберегти протиерозійну стійкість ґрунту у верхньому окультуреному шарі з метою збереження його структури та стерньового фону при безвідвальному обробітку ґрунту в системі ґрунтозахисного землеробства за технологіями «Verti-till» і «Strip-till».

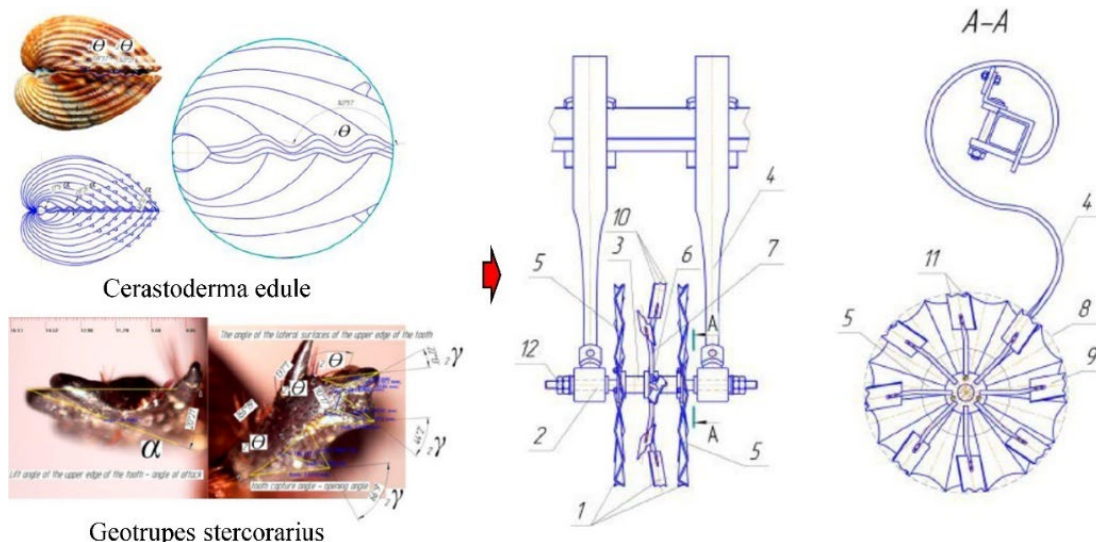


Рис. 6. Конструкція робочих органів хвилястих дисків за двома біонічними прототипами: риучою ніжкою та радіальними ребрами дисків двостулкової раковина їстівного серцеподібного моллюска (*Cerastoderma edule*) і риуча нога жука-гнойовика звичайного (*Geotrupes stercorarius*)
Джерело: [8].

У статті [37] метод біонічного проектування використовувався для зменшення енергоспоживання розпушувача ґрунту. Біонічні структурні елементи, тобто трикутне долото і стійка, були натхненні

реберною структурою плакоїдної луски шкіри акули, яка має низький опір. Ці елементи були застосовані для розробки шести біонічних глибокорозпушувача для зменшення споживання енергії (рис. 7).

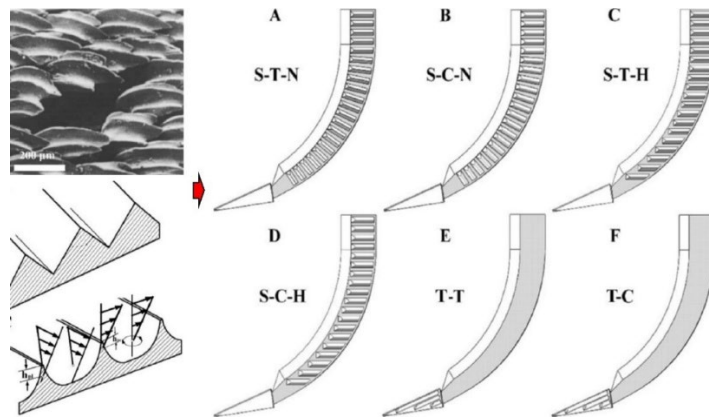


Рис. 7. Конструкція робочих органів глибокорозпушувачів, трикутне долото і стійка яких були натхненні реберною структурою плакоїдної луски шкіри акул
Джерело: [9].

У статті [38] на основі принципу біонічної інженерії оптимізацію традиційної лопати було проведено з урахуванням біонічних кривих структури

та морфології кігтя на ногах страуса (**рис. 8**). Біонічна лопата перевершила традиційну за критерієм зниження опору.

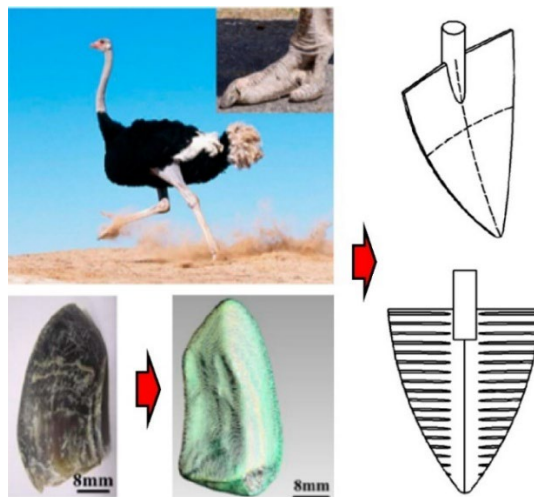


Рис. 8. Конструкція біонічної лопати на основі біонічних кривих структури та морфології кігтя на ногах страуса
Джерело: [10].

У статті [39] обґрунтуванні основні параметри моделі робочих органів культиватора-плоскоріза для обробки ґрунту на стерні з використанням двох біонічних прототипів (**рис. 9**) – віялоподібної щелепи жука-скарabeя (*Scarabaeus sacer*) та риучого ніжка

звичайного гнойовика (*Geotrupes stercorarius*). Модель робочого органу культиватора-плоскоріза дозволяє зберегти верхню стерню та забезпечити протиерозійну стійкість ґрунту в системі ґрунтозахисного землеробства за технологією «Mini-till».

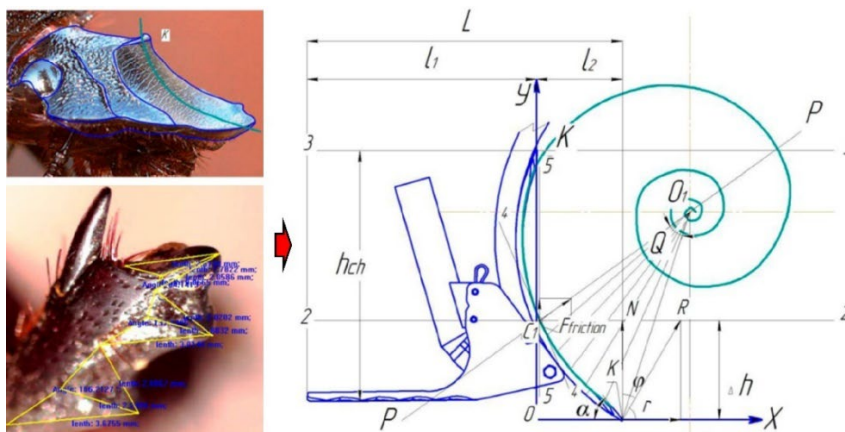


Рис. 9. Конструкція культиватора-плоскоріза для обробки ґрунту на стерні з використанням двох біонічних прототипів: віялоподібної щелепи жука-скарabeя (*Scarabaeus sacer*) та риучого ніжка звичайного гнойовика (*Geotrupes stercorarius*)
Джерело: [11].

У дослідженнях [40] розроблено конструкцію очисника стерні кукурудзи на основі біоніки передніх кінцівок крота (*рис. 10*). За допомогою теоретичного аналізу, комп'ютерного моделювання та

оптимізованого дизайну для тестування було вивчено механізм біонічних очищувачів, які мали морфологію руху передніх кінцівок і структурну морфологію переднього кігтя крота.

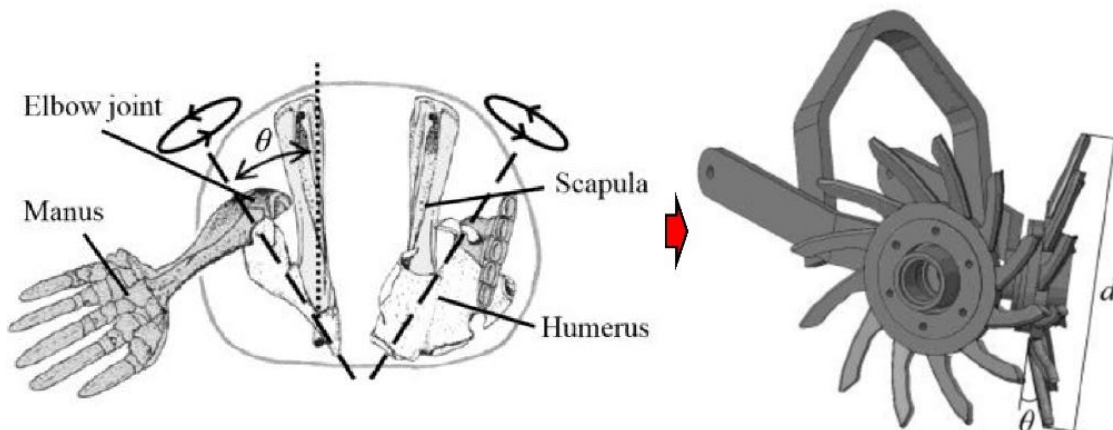


Рис. 10. Конструкція очисника стерні кукурудзи на основі біоніки передніх кінцівок крота
Джерело: [12].

В дослідженнях [41, 42] розроблена біонічна конструкція зубчастого колеса для імпринтингу ґрунту на основі геометричної подібності риючих кігтях тварин (*рис. 11*). Було виявлено, що механізм проникнення в ґрунт біонічного зубчастого колеса поведився як пила, що подібно до поведінки риття ґрунтових тварин. Геометрія зубчастої

структури має здатність до максимальної концентрації напруги в ґрунті, що підвищує схильність ґрунтового матеріалу до руйнування. Ці результати вказують на те, що біонічний підхід, натхненний конвергентною еволюцією, є новим і вигідним для розробки нових робочих знарядь для роботи з ґрунтом для оптимізації якості роботи та зменшення опору.

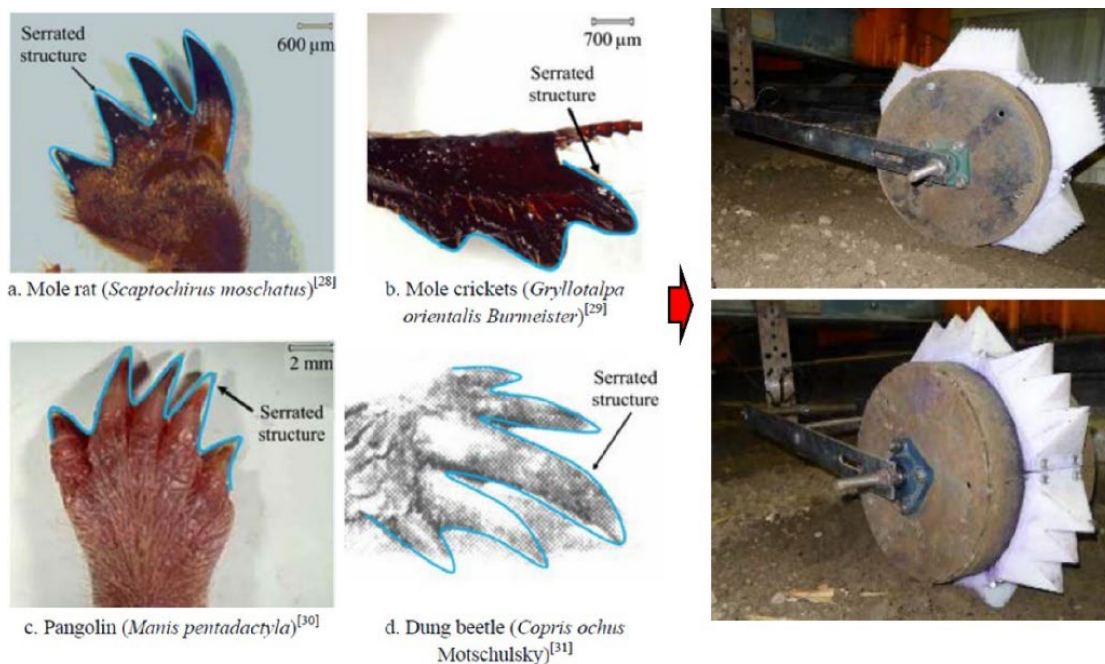


Рис. 11. Біонічна конструкція зубчастого колеса для імпринтингу ґрунту на основі геометричної подібності риючих кігтях тварин
Джерело: [13].

В роботі [43] розроблено біонічну конструкцію сошника із центральним лемішем для внесення рідких добрив через відкриту борозну, яка ґрунтується на обтічній кривій тіла осетрових (*рис. 12*). Результати випробувань показали,

що порівняно з сошником із стрижневим лемішем опір відкритої борозни та пошкодженням ґрунту біонічного сошника для глибокого внесення рідких добрив для осетрових є меншими.

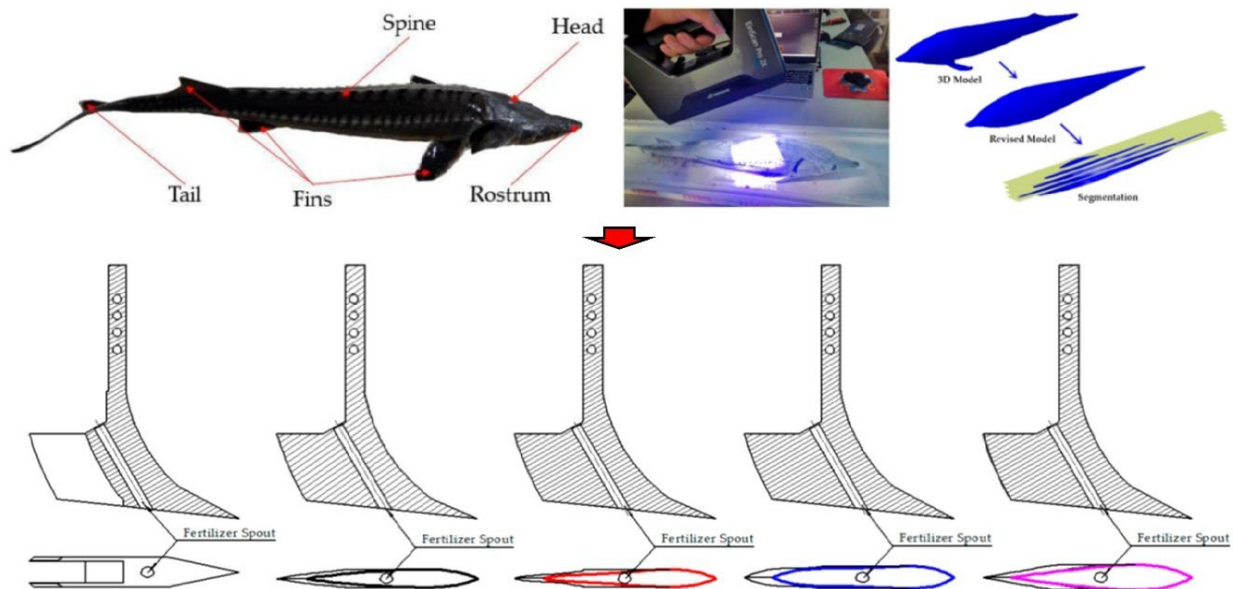


Рис. 12. Біонічна конструкція сошника із центральним лемішом для внесення рідких добрив через відкриту борозну, яка ґрунтується на обтічній кривій тіла осетрових
Джерело: [14].

В роботі [44] наведено результати дослідження конструкції лез ґрунтообробних органів (рис. 13) на основі структури тіла мокриці-броненосця (*Armadillidium vulgare*). Експериментальні результати показали, що на сухому ґрунті плоскі та біонічні леза мали однакову силу опору. У вологому ґрунті біонічне лезо призводило до найнижчої сили лобового опору, що пояснювалося швидшим рухом шару ґрунту на поверхні леза.

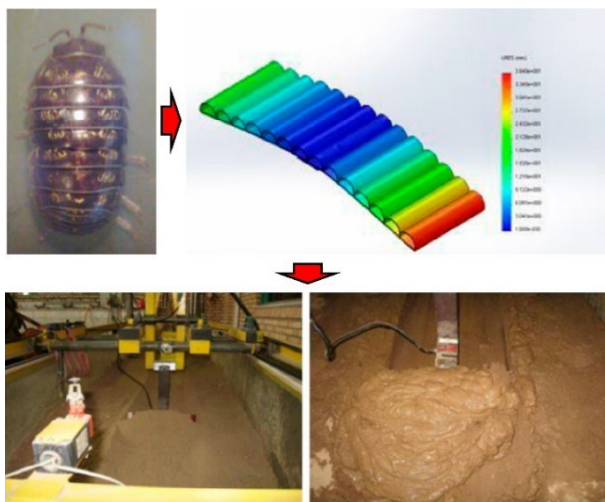


Рис. 13. Біонічна конструкція лез ґрунтообробних органів на основі структури тіла мокриці-броненосця (*Armadillidium vulgare*)
Джерело: [16].

Для оптимізації процесу проникнення в ґрунт у дослідженні [45] було розроблено та виготовлено шість зразків знарядь на основі контурів зубів борсука (рис. 14). В результаті чисельного моделювання і експериментальних досліджень встановлено, що контури борсукових зубів зменшують силу

проникнення, змінюючи напрямок сили та оптимізуючи властивості ґрунту. За результатами досліджень визначено оптимальну біонічну криву проникнення в різні типи ґрунтів.

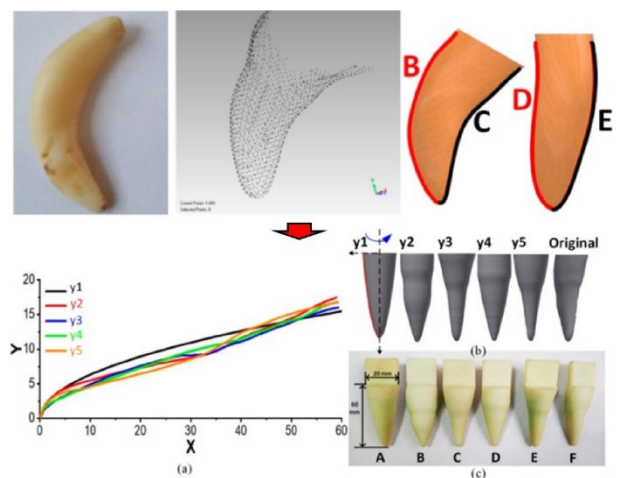


Рис. 14. Біонічна конструкція лез ґрунтообробних органів на основі структури тіла мокриці-броненосця (*Armadillidium vulgare*)
Джерело: [17].

В роботі [46] вчені натхненні комбінованим рухом поздовжнього різання ґрунту та бічного кидання ґрунту східним цвіркуном-кротом, було розроблено біонічне обертове лезо з контуром кривою краю виїмки передньої частини кігтя (рис. 15). Механічний і кінематичний аналіз біонічного обертового леза виявив його ріжучий механізм. Результати показали, що біонічне обертове лезо, засноване на краї екскавації та поверхні екскавації першого кігтя крота-цвіркуна, мало найбільшу відстань метання та найбільшу кількість розірваних зв'язків.

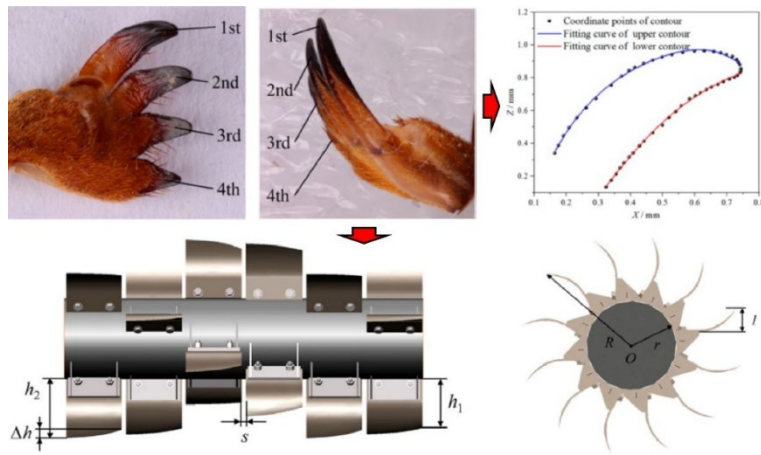


Рис. 15. Біонічне обертове лезо з контуром кривою кігтя східного цвіркуна-крота
Джерело: [18].

Основною особливістю голови кабана, яка використовується для їжі, є передня частина, яка за функціями, навантаженням і середовищем схожа на гребінь.

У статті [47] голова кабана була обрана як біологічний прототип для розробки нового підгортальника (рис. 16). Стійкість до проникнення

біонічного і традиційного підгортальників була перевірена на різних швидкостях. Результати випробувань показали, що біонічний підгортальник мав найкращий коефіцієнт зниження опору прониканню. Аналогічний принцип побудови знаряддя закладений в роботі [48].

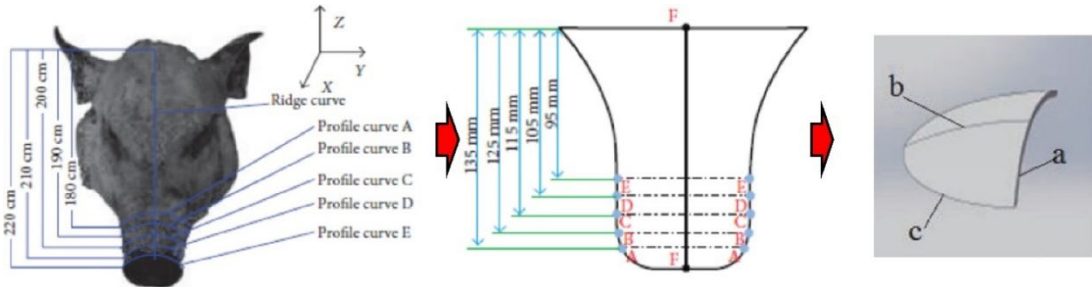


Рис. 16. Конструкція біонічного підгортальника на основі голови кабана
Джерело: [19].

В дослідженнях [49] було розроблено високо-ефективне біонічне знаряддя для розпушування ґрунту під час збирання моркви, що забезпечує менший опір ґрунту. В якості біонічного прототипу було обрано кігті борсука (рис. 17). В роботі розроблено конструкції крил знаряддя. Віртуальний симуляційний експеримент показує, що створене біонічне знаряддя може ефективно вирішувати

проблеми низького рівня пошкодження ґрунту та високого його опору та високої кількості браку моркви, а також покращує якість збирання врожаю та ефективність морквозбиральних комбайнів і відповідає вимогам агротехнічні вимоги збирання моркви. Аналогічна біоніка була використана в роботі [50] для розробки біонічного знаряддя для розпилення рідких добрив для глибокого внесення.

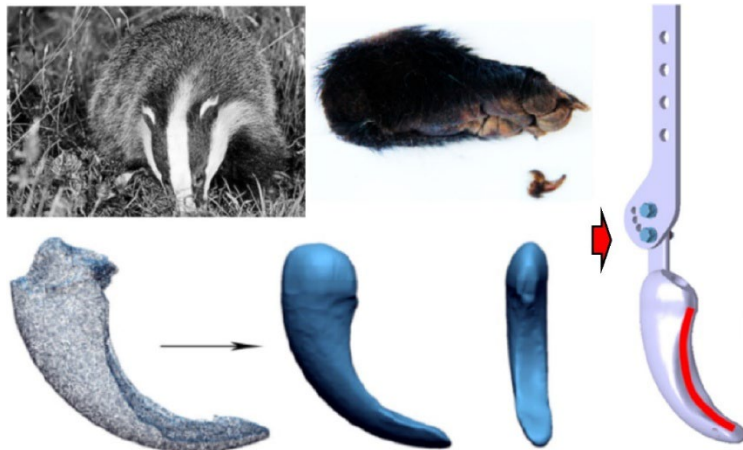


Рис. 17. Конструкція високоефективного біонічного знаряддя для розпушування ґрунту під час збирання моркви на основі кігтів борсука
Джерело: [21].

Стаття [51] розкриває біосистемний підхід до обґрунтування конструкцій пружних робочих органів культиватора-плоскоріза, які зберігають протиерозійну стійкість ґрунту у верхньому оброблюваному пласті з метою збереження його

структури і стерневого фону безотвальної обробки ґрунту за технологією «Mini-Till». Проаналізувавши будову та принцип роботи ската-рогача, була розроблена конструкція запропонованого культиватора-плоскоріза (рис. 18).

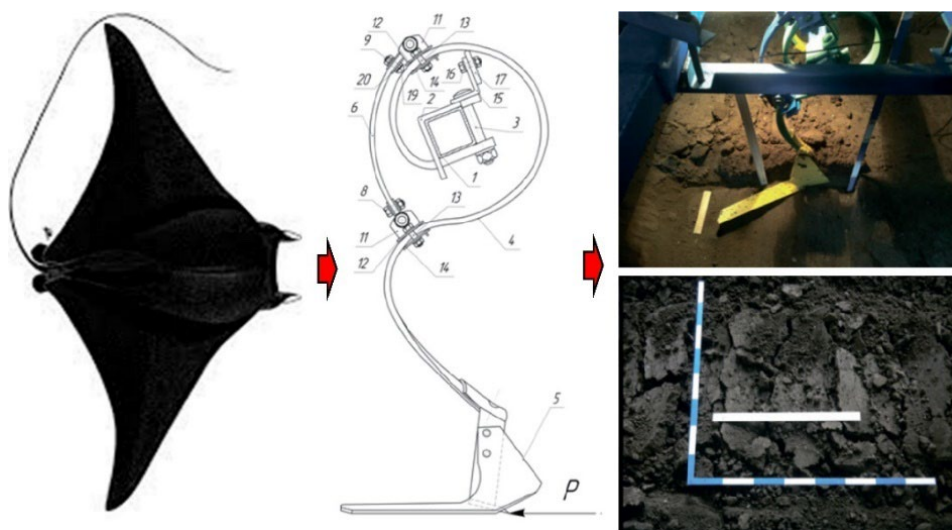


Рис. 18. Конструкція біонічного культиватора-плоскоріза на основі ската-рогача
Джерело: [23].

Як зазначено в роботі [52] конструкція та матеріал зубів фрези є одними з ключових елементів у дрібному розриванні верхнього шару ґрунту. Щоб покращити ефективність обробки ґрунту дробильними ріжучими зубами, запропоновано біонічний

прототип ріжучих зубів, натхнений кігтями борсука (рис. 19). Крім того, поверхня зубів фрези була модифікована антиадгезійним покриттям. Результати показали, що ріжучі зуби з біонічною структурою можуть ефективно зменшувати середній опір різанню.

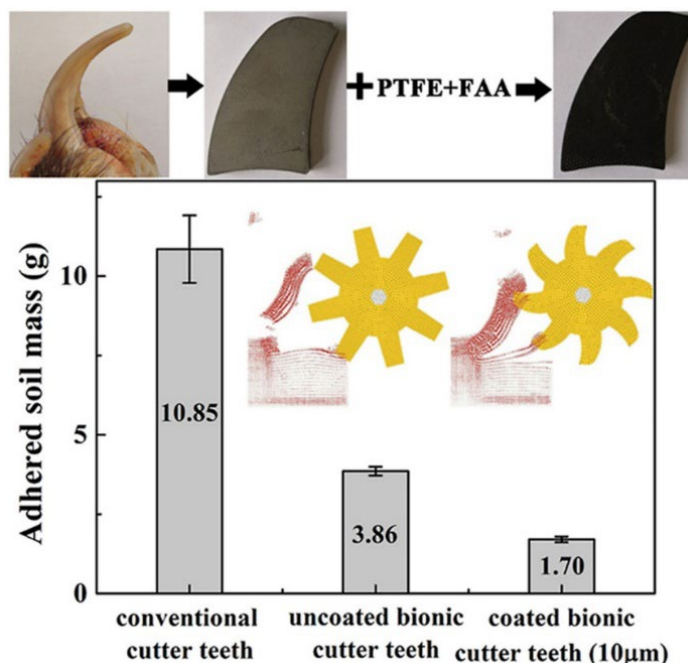


Рис. 19. Конструкція зубів фрези на основі біоніки кігть борсука
Джерело: [24].

У статті [53] успішно змодельовала ефект того, що долото глибокорозпушувача був зламаний біонічним розпушувачем. Силу лапи крота під час викопування ґрунту спочатку проаналізували за

допомогою математичної моделі, а потім було розроблено біонічний глибокорозпушувач, який відповідає вимогам розкопок, поєднавши структуру кігтя крота зі стандартним глибокорозпушувачем (рис. 20).

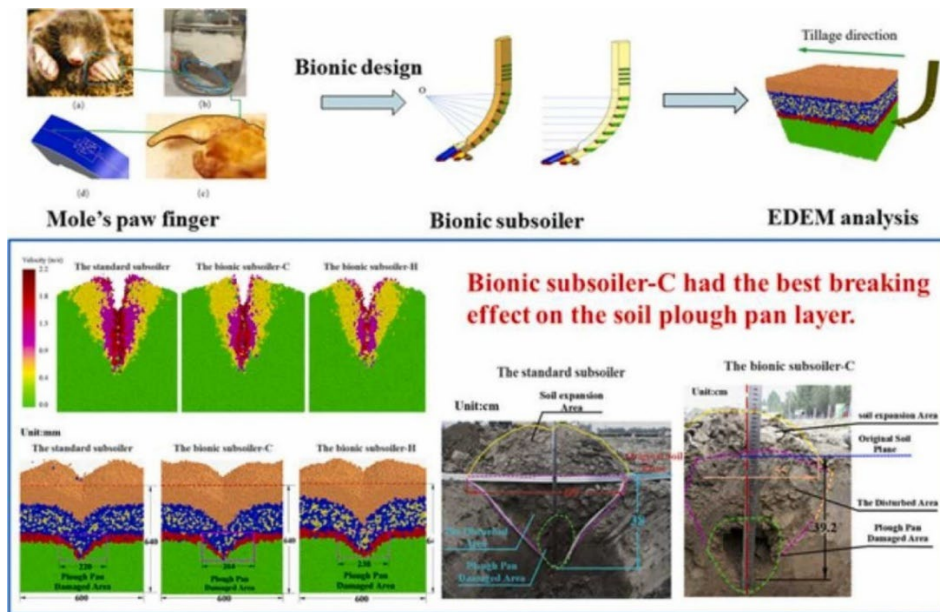


Рис. 20. Конструкція долота глибокорозпушувача на основі структури кігтя крота
Джерело: [25].

Щоб вирішити проблему високих енерговитрат у дослідженні [54] були розроблені біоміметичні ротаційні ґрунтообробні леза для зниження крутного моменту та потреби в енергії на основі геометричних характеристик п'яти передніх кігтів слеписів, включаючи контурні криві п'яти кінчиків кігтів та структурні характеристики багатоклапшової комбінації (рис. 21). Оптимальне лезо було обрано з урахуванням трьох факторів: відношення ширини кігтя до бічної відстані, кута нахилу комбінації з кількома кігтями та швидкості обертання через ґрунтові дослідити. Аналогічні результати отримані в дослідженнях [55].

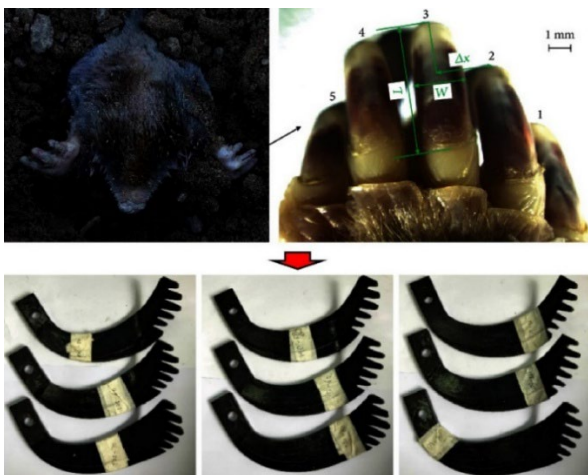


Рис. 21. Конструкція ротаційного ґрунтообробного леза на основі геометричних характеристик п'яти передніх кігтів слеписів
Джерело: [26].

Проведений аналіз демонструє те, що інжиніринг біонічних ґрунтообробних знарядь дозволяє підвищити їх ефективність за рахунок зменшення енерговитрат і покращення процесу розпушення

ґрантового середовища і різання рослинних залишків. Біонічні технічні засоби в зв'язку з інформаційними технологіями, інтелектуальними системами керуванням та сучасними технологіями мінімального обробітку ґрунту забезпечують краще зберігання та розподілення вологи в ґрунті, а також краще його удобрення, що призводить до підвищення врожайності при низьких витрат.

В монографії [16] створена методика і відповідна структурна схема розробки й оцінки зональних технологій та технічних засобів обробітку ґрунту. Дана схема включає 10 основних пунктів:

- аналіз багаторічних даних вологості ґрунту;
- визначення зміни агрофізичних і реологічних властивостей ґрунту;
- визначення факторів, що є лімітуючими, для конкретних ґрунтово-кліматичних умов;
- визначення емпіричних залежностей впливу стану орного горизонту на врожайність сільськогосподарських культур;
- розробка технологій механізованого обробітку ґрунту з набором ґрунтообробних робочих органів;
- розробка механіко-математичних моделей взаємодії ґрунтообробних робочих органів із ґрунтом;
- вибір за результатами теоретичних досліджень із урахуванням світового досвіду основних конструктивно-технологічних параметрів робочих органів ґрунтообробних машин;
- проведення експериментальних досліджень робочих органів-аналізаторів на основі математичного планування експериментів;
- визначення раціональних параметрів технологій та технічних засобів;
- апробація запропонованої технології обробітку ґрунту разом із новими розробленими знаряддями.

Також в роботі [16] зазначається, що для здійснення пошукових робіт у різних зонах не потрібно витрачати кошти на створення нових експериментальних робочих органів. Замість цього,

рекомендується проводити дослідження типових робочих органів-аналізаторів. Методика базується на цілеспрямованому доборі параметрів робочих органів за допомогою оптимізації багатofакторного експерименту.

Приведена методика дійсно дозволяє в загальному сенсі проектувати ґрунтообробні робочі органи за традиційними методами, які відомі ще з 1900 р. (часів Горячкін В. В. [56] і Василенка П. М. [57]). Однак вона не містить сучасних методів моделювання, які основані на CAD/CAE-системах, сучасних інженерних програм обробки результатів експериментальних досліджень, а також біонічних принципів проектування.

Тому, спираючись на власному досвіді чисельного моделювання [58–60], аналізу локомотії та

морфології тварин [61] і обробки результатів експериментальних досліджень [62] доповнено методику проектування ґрунтообробних знарядь, яку будемо називати «Інжиніринг біонічних технічних засобів обробітку ґрунту» (рис. 22).

Представлена методика проектування ґрунто-обробних знарядь містить 5 блоків: технологічні вимоги, біонічні принципи проектування, чисельне моделювання, експериментальні дослідження, виробничі випробування. Блок «Технологічні вимоги» визначає вхідні дані для проведення проектування, а саме агрофізичні і реологічні властивості ґранту, які залежать від його типу, складу і вологості, та технології обробітку ґрунту.

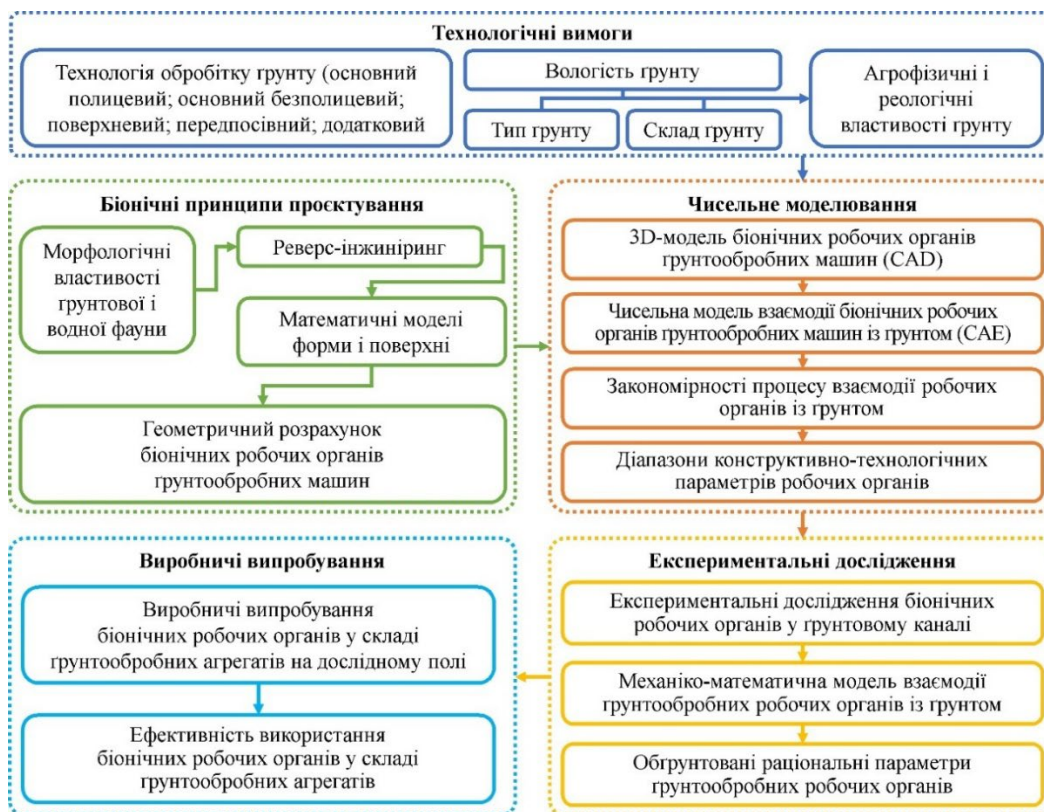


Рис. 22. Інжиніринг біонічних технічних засобів обробітку ґрунту

Джерело: складено авторами.

Блок «Чисельного моделювання» містить: 3D-модель біонічних робочих органів ґрунтообробних машин (CAD), чисельна модель їх взаємодії із ґрунтом (CAE), отриманні закономірності процесу цієї взаємодії, визначенні діапазони конструктивно-технологічних параметрів робочих органів. Блок «Експериментальні дослідження» є традиційним багатofакторним експериментом, однак створення механіко-математичної моделі взаємодії ґрунтообробних робочих органів із ґрунтом і обґрунтування раціональних параметрів відбувається з використанням сучасних інженерних програм, наприклад, Wolfram Cloud. Блок «Виробничі випробування» є також традиційним, однак при дослідженнях використовується сучасні вимірювальні комплекси на основі GPS-трекінгу, тензометрії тощо.

Висновки

Приведений аналіз морфологічних властивостей ґрунтової і водної фауни підкреслює актуальність застосування форми їх тіла і поверхні покрову при проектуванні робочих органів технічних засобів обробітку ґрунту. Використання таких біонічних робочих органів дозволяють знизити адгезію ґрунту і його опір на обтікання робочого органу, забезпечуючи при цьому ефективне прорізання ґрунтового середовища.

Аналіз досліджень біонічних ґрунтообробних робочих органів показав великий спектр застосування морфологічних властивостей ґрунтової і водної фауни для різних видів технічних засобів обробітку ґрунту.

Однак в приведених дослідженнях не прослідковується узагальненої методика проектування біонічних ґрунтообробних знарядь. Тому спираючись на власному досвіді чисельного моделювання, аналізу локомоції та морфології тварин і обробки результатів експериментальних досліджень доповнено методику проектування ґрунтообробних знарядь, яка має назву «Інжиніринг біонічних технічних засобів обробітку ґрунту». Представлена методика проектування ґрунтообробних знарядь містить 5 блоків: технологічні вимоги, біонічні принципи проектування, чисельне моделювання, експериментальні дослідження, виробничі випробування.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження будуть спрямовані на визначення конкретних закономірностей і взаємозв'язків морфології і локомоції тварин ґрунтової і водної фауни із проектування робочих органів технічних засобів обробітку ґрунту та їх взаємодії із ґрунтовим середовищем.

Конфлікт інтересів





Автори стверджують про відсутність конфлікту інтересів щодо їхнього викладу та результатів досліджень.

References

- Zhang, N., Wang, M., & Wang, N. (2002). Precision agriculture – a worldwide overview. *Computers and Electronics in Agriculture*, 36 (2–3), 113–132. [https://doi.org/10.1016/s0168-1699\(02\)00096-0](https://doi.org/10.1016/s0168-1699(02)00096-0)
- Hmidet, I. (2020). Bionic design architectural innovations inspired by nature with a focus on concrete shell structures. *Bachelor Thesis. Bachelor of Science in Civil Engineering. Technical University of Munich*. 153. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25490.48329>
- Yongxiang, L. (2004). Significance and progress of bionics. *Journal of Bionic Engineering*, 1 (1), 1–3. <https://doi.org/10.1007/bf03399448>
- Dickinson, M. H. (1999). Bionics: Biological insight into mechanical design. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96 (25), 14208–14209. <https://doi.org/10.1073/pnas.96.25.14208>
- Kucheruk, L. Yu. (2021). *Bionika v silskomu hospodarstvi ta biomedychna inzheneriia u veterynarii: tematychnyi bibliografichnyi pokazchych literatury na dopomohu naukovodoslidnii roboti, v kilkocti 209 nazv dokumentiv ukrainskoiu, rosiiskoiu ta inozemnymy movamy*. Kyiv: NUBiP Ukrainy [in Ukrainian]
- Babytskyi, L. F., & Moskalevych, V. Yu. (1999). Bionic desing of process of tooling of soil. *Proceedings of Tavria State Agrotechnological University*, 10 (8), 357–366.
- Babytskyi, L. F. (1998). *Bionichni napriamy rozrobky ґрунтообробnykh mashyn*. Kyiv: Urozhai [in Ukrainian]
- Babitsky, L. F., Sobolevsky, I. V., & Kuklin, V. A. (2020). Bionic modelling of the working bodies of machines for surface tillage. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 488 (1), 012041. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/488/1/012041>
- Babitsky, L. F., & Moskalevich, V. Yu. (2023). Bionics in the development of agricultural machines taking into account the processed material and the created devices properties in determining characteristics. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*, 1 (142), 4–14. <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2023-1-4-14>
- Tu, C., Li, J., Wang, X., Shen, C., & Li, J. (2021). Bionic technology and deep learning in agricultural engineering: Current status and future prospects. *American Journal of Biochemistry and Biotechnology*, 17 (2), 217–231. <https://doi.org/10.3844/ajbbbsp.2021.217.231>
- Chirende, B., & Jianqiao, L. (2009). Review on application of biomimetics in the design of agricultural implements. *Biotechnology and Molecular Biology Reviews*, 4 (2), 042–048
- Schneider, F., Steiger, D., Ledermann, T., Fry, P., & Rist, S. (2010). No-tillage farming: co-creation of innovation through network building. *Land Degradation & Development*, 23 (3), 242–255. Portico. <https://doi.org/10.1002/ldr.1073>
- López, M. V., Blanco-Moure, N., Limón, M. Á., & Gracia, R. (2012). No tillage in rainfed Aragon (NE Spain): Effect on organic carbon in the soil surface horizon. *Soil and Tillage Research*, 118, 61–65. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.10.012>
- Chaplain, V., Défossez, P., Richard, G., Tessier, D., & Roger-Estrade, J. (2011). Contrasted effects of no-till on bulk density of soil and mechanical resistance. *Soil and Tillage Research*, 111 (2), 105–114. <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.08.015>
- Hukov, Ya. S. (1999). *Obrobitorok ґрунту. Tekhnolohiia i tekhnika. Mekhaniko-tekhnolohichne obruntuvannia enerhozberihaiuchykh zasobiv dlia mekhanizatsii obrobitorok ґрунту v umovakh Ukrainy*. Kyiv: Nora-Print [in Ukrainian]
- Shevchenko, I. A. (2016). *Keruvannia ahrofizychnym stanom ґруntovoho seredovyscha*. Kyiv: Vydavnychiy dim «Vinichenko» [in Ukrainian]
- Jia, X. (2006). Unsmooth cuticles of soil animals and theoretical analysis of their hydrophobicity and anti-soil-adhesion mechanism. *Journal of Colloid and Interface Science*, 295 (2), 490–494. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.11.057>
- Spagnoli, G., Klitzsch, N., Fernandez-Steeger, T., Feinendegen, M., Rey, A. R., Stanjek, H., & Azzam, R. (2011). Application of electro-osmosis to reduce the adhesion of clay during mechanical tunnel driving. *Environmental & Engineering Geoscience*, 17 (4), 417–426. <https://doi.org/10.2113/gsegeosci.17.4.417>
- Ren, L., Cong, Q., Tong, J., & Chen, B. (2001). Reducing adhesion of soil against loading shovel using bionic electro-osmosis method. *Journal of Terramechanics*, 38 (4), 211–219. [https://doi.org/10.1016/s0022-4898\(01\)00002-7](https://doi.org/10.1016/s0022-4898(01)00002-7)
- Ren, L.-Q., Tong, J., Li, J.-Q., & Chen, B.-C. (2001). SW–Soil and Water. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 79 (3), 239–263. <https://doi.org/10.1006/jaer.2001.0722>
- Ren, L. (2009). Progress in the bionic study on anti-adhesion and resistance reduction of terrain machines. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 52 (2), 273–284. <https://doi.org/10.1007/s11431-009-0042-3>
- Ren, L. Q. (2008). Bionic research on anti-adhesion and anti-resistance of terrain machine. *Journal of Science China: Technological Sciences*, 9, 1353–1364.
- Tong, J., Sun, J., Chen, D., & Zhang, S. (2005). Geometrical features and wettability of dung beetles and potential biomimetic engineering applications in tillage implements. *Soil and Tillage Research*, 80 (1–2), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.still.2003.12.012>
- Dai, Z., Tong, J., & Ren, L. (2006). Researches and developments of biomimetics in tribology. *Chinese Science Bulletin*, 51 (22), 2681–2689. <https://doi.org/10.1007/s11434-006-2184-z>
- Ren, L., Deng, S., Wang, J., & Han, Z. (2004). Design principles of the non-smooth surface of bionic plow moldboard. *Journal of Bionic Engineering*, 1 (1), 9–19. <https://doi.org/10.1007/bf03399450>
- Koch, K., Bhushan, B., & Barthlott, W. (2009). Multifunctional surface structures of plants: An inspiration for biomimetics. *Progress in Materials Science*, 54 (2), 137–178. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2008.07.003>
- Tong, J., Moayad, B. Z., Ma, Y., Sun, J., Chen, D., Jia, H., & Ren, L. (2009). Effects of biomimetic surface designs on furrow opener performance. *Journal of Bionic Engineering*, 6 (3), 280–289. [https://doi.org/10.1016/s1672-6529\(08\)60128-6](https://doi.org/10.1016/s1672-6529(08)60128-6)
- Skorinkin, A. I. (2015). *Mathematical modeling of biological processes*. Kazan
- Sharma, S. K., & Grewal, H. S. (2023). Tribological behavior of bioinspired surfaces. *Biomimetics*, 8 (1), 62. <https://doi.org/10.3390/biomimetics8010062>
- Liu, S., Weng, S., Liao, Y., & Zhu, D. (2014). Structural bionic design for digging shovel of cassava harvester considering soil mechanics. *Applied Bionics and Biomechanics*, 11 (1–2), 1–11. <https://doi.org/10.1155/2014/658743>
- Zhou, D., Hou, P., Xin, Y., Wu, B., Tong, J., Yu, H., Qi, J., Zhang, J., & Zhang, Q. (2021). Resistance and consumption reduction mechanism of bionic vibration and verification of field subsoiling experiment. *Applied Sciences*, 11 (21), 10480. <https://doi.org/10.3390/app112110480>

32. Huang, W., Li, M., Ge, C., Wei, L., Niu, Z., & Zhu, X. (2020). Optimization design and experimental analysis of bionic viscosity reduction of chisel type energy saving subsoiling shovel. *Journal of Physics: Conference Series*, 1635 (1), 012036. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1635/1/012036>
33. Zhao, J., Lu, Y., Guo, M., Fu, J., & Wang, Y. (2021). Design and experiment of bionic stubble breaking-deep loosening combined tillage machine. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 14 (3), 123–134. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20211404.6473>
34. Li, M., Yang, Y., Guo, L., Chen, D., Sun, H., & Tong, J. (2015). Design and analysis of bionic cutting blades using finite element method. *Applied Bionics and Biomechanics*, 2015, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2015/471347>
35. Babitsky, L. F., Sobolevsky, I. V., & Kalafatov, I. I. (2021). Justification of the rotary working bodies of the cultivator for processing between the rows of plantations of lavender oilseed on the basis of agricultural biomechanics. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 937 (4), 042020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/937/4/042020>
36. Sobolevsky, I. V., Pashetskii, V. S., & Kalafatov, I. I. (2021). Substantiation of the parameters of the working bodies of undulating disks of soil-cultivating harrows with a bionic approach. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 845 (1), 012140. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/845/1/012140>
37. Sun, J., Wang, Y., Ma, Y., Tong, J., & Zhang, Z. (2018). DEM simulation of bionic subsoilers (tillage depth >40 cm) with drag reduction and lower soil disturbance characteristics. *Advances in Engineering Software*, 119, 30–37. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2018.02.001>
38. Zhang, R., Han, D., He, Y., Wan, H., Ma, S., & Li, J. (2018). Drag reduction and wear resistance mechanisms of a bionic shovel by discrete element method simulation. *Simulation*, 95 (3), 231–239. <https://doi.org/10.1177/0037549718784658>
39. Babitsky, L. F., Sobolevsky, I. V., & Kuklin, V. A. (2021). Methodology for designing tillage working bodies of a stubble cultivator-flat-cutter based on agricultural biomechanics. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 868 (1), 012007. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/868/1/012007>
40. Jia, H., Wang, Q., Huang, D., Zhu, L., Li, M., & Zhao, J. (2019). Design of bionic mole forelimb intelligent row cleaners. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 12 (3), 27–35. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20191203.4408>
41. Zhang, Z., Li, Y., Tong, J., & Carr, S. (2019). Convergent evolution inspired serrated structure for improving efficiency of soil imprinting and its mechanism investigation. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 12 (4), 16–26. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20191204.3638>
42. Zhang, Z., Wang, X., Tong, J., & Stephen, C. (2018). Innovative design and performance evaluation of bionic imprinting toothed wheel. *Applied Bionics and Biomechanics*, 2018, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2018/9806287>
43. Wang, J., Wen, N., Liu, Z., Zhou, W., Tang, H., Wang, Q., & Wang, J. (2022). Coupled bionic design of liquid fertilizer deep application type opener based on sturgeon streamline to enhance opening performance in cold soils of Northeast China. *Agriculture*, 12 (5), 615. <https://doi.org/10.3390/agriculture12050615>
44. Massah, J., Hassanpour Roudbeneh, F., Hassanpour Roudbeneh, Z., & Asefpour Vakilian, K. (2020). Experimental investigation of bionic soil-engaging blades for soil adhesion reduction by simulating armadillidium vulgare body surface. *Inmateh Agricultural Engineering*, 60 (1), 99–106. <https://doi.org/10.35633/inmateh-60-11>
45. Ma, Y., Wang, H., Zhuang, J., Qi, H., & Yu, J. (2020). Effects of bionic curves on penetration force under difference soils. *Applied Sciences*, 10 (2), 529. <https://doi.org/10.3390/app10020529>
46. Zhu, H., Wang, D., He, X., Shang, S., Zhao, Z., Wang, H., Tan, Y., & Shi, Y. (2022). Study on plant crushing and soil throwing performance of bionic rotary blades in cyperus esculentus harvesting. *Machines*, 10 (7), 562. <https://doi.org/10.3390/machines10070562>
47. Li, J., Yan, Y., Chirende, B., Wu, X., Wang, Z., & Zou, M. (2017). Bionic design for reducing adhesive resistance of the ridger inspired by a boar's head. *Applied Bionics and Biomechanics*, 2017, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2017/8315972>
48. Zhang, Z., Jia, H., & Sun, J. (2015). Bioinspired design of a ridging shovel with anti-adhesive and drag reducing. *Advances in Mechanical Engineering*, 7 (3). <https://doi.org/10.1177/1687814014568547>
49. Zhou, W., Ni, X., Song, K., Wen, N., Wang, J., Fu, Q., Na, M., Tang, H., & Wang, Q. (2023). Bionic optimization design and discrete element experimental design of carrot combine harvester ripping shovel. *Processes*, 11 (5), 1526. <https://doi.org/10.3390/pr11051526>
50. Zhou, W., Ni, X., Wen, N., An, T., & Wang, Y. (2023). Bionic design of liquid fertilizer deep application spray needle, based on badger claw-toe, for improving the operating performance of liquid fertilizer deep application in Northeast China. *Processes*, 11 (3), 756. <https://doi.org/10.3390/pr11030756>
51. Babitsky, L. F., & Sobolevsky, I. V. (2016). Bionic design justification of resilient working bodies of the flat cut cultivator. *Transactions of Taurida Agricultural Science*, 6 (169), 50–59.
52. Guan, C., Fu, J., Xu, L., Jiang, X., Wang, S., & Cui, Z. (2022). Study on the reduction of soil adhesion and tillage force of bionic cutter teeth in secondary soil crushing. *Biosystems Engineering*, 213, 133–147. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.11.018>
53. Song, W., Jiang, X., Li, L., Ren, L., & Tong, J. (2022). Increasing the width of disturbance of plough pan with bionic inspired subsoilers. *Soil and Tillage Research*, 220, 105356. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105356>
54. Yang, Y., Tong, J., Huang, Y., Li, J., & Jiang, X. (2021). Biomimetic rotary tillage blade design for reduced torque and energy requirement. *Applied Bionics and Biomechanics*, 2021, 1–16. <https://doi.org/10.1155/2021/8573897>
55. Wang, B., Chen, M., Wei, J., Liang, G., & Liang, K. (2022). Bionic optimization design of rotary tiller based on fuzzy algorithm. *Mobile Information Systems*, 2022, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2022/1203973>
56. Erokhin, M. N., Zaitseva, N. L., & Aldoshin, N. V. (2018). *Vasily Prokhorovich Goryachkin: memories of contemporaries: Monograph*. Moscow: RGAU-MSKHA.
57. Voitiuk, D. H., Verhunov, V. A., Mudruk, O. S., & Derkach, O. P. (2005). *Naukova shkola akademika Vasylenka Petra Mefodiiovycha: Monohrafiia*. Kyiv: Ahrararna osvita [in Ukrainian]
58. Aliiev, E. B., Bandura, V. M., Pryshliak, V. M., Yaropud, V. M., & Trukhanska, O. O. (2018). Modeling of mechanical and technological processes of the agricultural industry. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 54 (1), 95–104.
59. Shevchenko, I., & Aliiev, E. (2020). Improving the efficiency of the process of continuous flow mixing of bulk components. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (1 (108)), 6–13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.216409>
60. Aliiev, E., Pavlenko, S., Golub, G., & Bielka, O. (2022). Research of mechanized process of organic waste composting. *Agraarteadus, Journal of Agricultural Science*, XXXIII (1), 21–32. <https://doi.org/10.15159/jas.22.04>
61. Aliiev, E., & Gavrilchenko, O. (2018). Method for estimating the state of the support and motor apparatus of cattle. *Scientific Horizons*, 73 (12), 3–7. <https://doi.org/10.33249/2663-2144-2018-73-12-3-7>
62. Kozachenko, O., Aliiev, E., & Sedykh, K. (2021). Results of investigation of the spring shank disc harrow performance. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*, 83 (4), 123–140.

ORCID

- A. Kobets  <https://orcid.org/0000-0002-2507-7763>
- E. Aliiev  <https://orcid.org/0000-0003-4006-8803>
- H. Tesliuk  <https://orcid.org/0000-0003-4541-5720>
- O. Zolotovska  <https://orcid.org/0000-0001-5617-9271>



© 2024 Kobets A. et al. This is an open-access article distributed under the Creative Commons Attribution License <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.