



DOI: 10.31388/2220-8674-2023-1-2

УДК 631.31

Б. А. Волик, к.т.н., доц.

ORCID: 0000-0002-9861-3723

Г. В. Теслюк, к.т.н., доц.

ORCID: 0000-0003-4541-5720

А. В. Коновий

ORCID: 0000-0002-2155-0795

Є. І. Лепеть

ORCID: 0000-0002-0482-538X

Дніпровський державний аграрно-економічний університет

e-mail: volikb@ukr.net, тел.: 097-072-92-85

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАСОБІВ МЕХАНІЗАЦІЇ ОБРОБІТКУ ҐРУНТУ

Анотація. В статті розглянуті загальні принципи розробки ґрунтообробних знарядь. Показано що всі етапи розробки і проектування машин в сукупності являють собою послідовну систему модельних досліджень. Проаналізовано можливості кожного з видів моделювання, в тому числі і в разі сумісного використання. Обґрунтована перспективність залучення до процесу розробки методів біоніки і фізичного моделювання. Необхідна умова функціонування обох моделей – це наявність адекватної математичної моделі взаємодії з ґрунтом. В разі біонічних досліджень математична модель дозволяє виконати адаптацію до ґрунтового середовища, в разі фізичного – визначити раціональні критерії подібності.

Слід відмітити що жодна з моделей не дозволяє отримати прогнозовані якісні показники кришення і розпушення

Ключові слова: модельні дослідження, біоніка, фізичне моделювання адаптація до середовища, критерій подібності. Критерій раціональності конструкції.

Постановка проблеми. Процес розробки машин має певні закономірності поетапного переходу від формування загальної концепції до отримання технічного рішення натурального зразка машини. Всі етапи можна розглядати як окремі види моделювання. Розглянемо процес послідовно. Перш за все, необхідно проаналізувати існуючий технологічний процес, що виконує машина і окреслити недоліки. Фактично розглядаються зовнішні прояви взаємодії робочого органу з оброблюваним середовищем, тобто досліджується стохастична модель процесу. За результатами приймається рішення по модернізації робочого органу, або заміні його іншим, більш досконалим. Для цього потрібен генератор ідеї, який би видав адекватне технічне рішення, яке

в подальшому буде адаптоване під конкретний технологічний процес за допомогою як натурних, так і модельних досліджень. В якості генератора такого рішення найчастіше виступає сам розробник машини і робить він це на основі власного досвіду і аналізу відомих технічних рішень, Етап можна розглядати як окремий вид моделювання, а саме: інтуїтивно-аналоговий. Виконати це може тільки розробник на основі власної інтуїції і аналізу відомих конструктивних рішень.

Інтуїтивно-аналітичний аналіз – це по суті традиційна дослідницька практика, у ході якої спеціаліст, використовуючи свої знання, логіку і інтуїцію, створює модель досліджуваного процесу і робочого органу для його виконання. Як правило ця модель розробляється на основі систематизації параметрів досліджуваного явища і емпіричного масиву інформаційних даних, що відносяться до нього. Наступні етапи являють собою процес адаптації прийнятого конструктивного рішення до умов реальної експлуатації. Як показує аналіз існує потреба в систематизації складових загального процесу розробки робочого органу, що дозволить раціоналізувати процес.

Аналіз досліджень. В цілому узагальнена схема досліджень може бути представлена наступним чином, рис. 1.

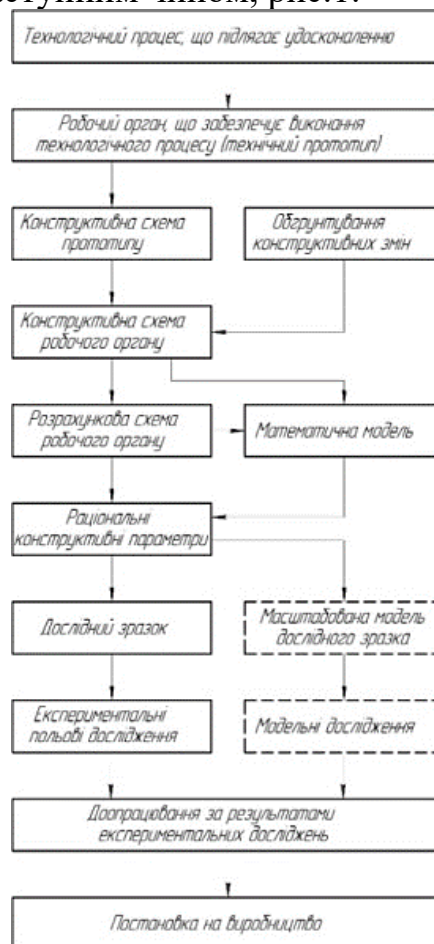


Рисунок 1. Зміст і послідовність операцій по розробці робочого органу

Представлена на рис.1 функціональна схема сама по собі є моделлю технологічного процесу розробки робочого органу і машини в цілому. Схема має ряд складових, систематизація яких представлена на рис. 2.

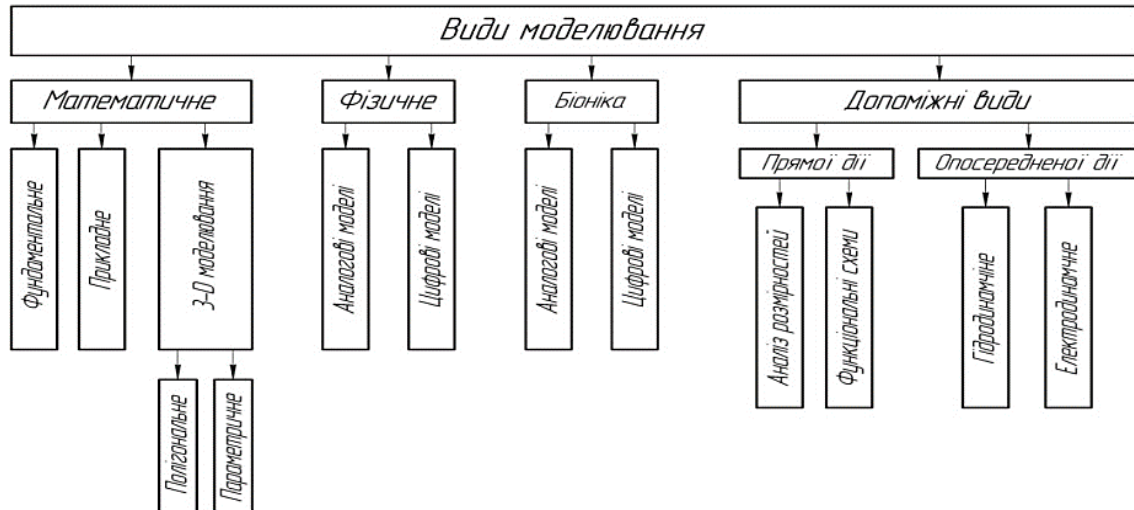


Рисунок 2. Систематизація видів моделювання сільськогосподарських машин

Як видно зі схеми, частина етапів забезпечує формування геометричної і цифрової моделі, а частина адаптацію цієї моделі до виконання технологічного процесу в умовах ґрунтового середовища

На підтвердження працездатності наведеної класифікації необхідно розробити моделі однотипних робочих органів за різними методиками і порівняти конструктивні виконання. Показовими в цьому плані є прикладні моделі формування конструктивних параметрів стрільчастої лапи, глибокорозпушувача і полицевого плуга. Позитивним в такому виборі є також те, що результати досліджень можна порівняти з дослідженнями закордонних авторів [1, 2].

Розглянемо їх в порядку, представленому на рис.2.

1. Математичне моделювання.

Сутність математичної моделі полягає в аналітичному визначенні залежності прогнозованого тягового опору робочого органу і показників якості виконання технологічного процесу від конструктивних параметрів знаряддя і механіко-технологічних властивостей оброблюваного середовища. Загальновідомі математичні моделі [3] в своїй основі мають конструкцію конкретних робочих органів, тобто вони не є універсальними. Тому існує проблема розробки математичної моделі, яку можна було б розповсюдити на широкую гаму робочих органів

Фундаментальні моделі безпосередньо не можна використати для обґрунтування конструкцій машин, але на їх основі розробляються прикладні. Проаналізуємо можливості використання фундаментальних



моделей.

1.1. Емпіричні моделі.

Перш за все розглянемо головну емпіричну модель – раціональну формулу В.П. Горячкіна. В розгорнутому виді модель має вид:

$$P = Gf + kabn + \varepsilon abnv^2 \quad (1)$$

де P – тяговий опір;

G – вага плуга;

a, b – відповідно глибина оранки і ширина захвату корпусів;

n – кількість корпусів;

f – коефіцієнт опору на переміщення плуга у борозні;

k – коефіцієнт питомого опору ґрунту, Н/см²;

ε – коефіцієнт форми, кНс²м⁻⁴.

В рівнянні (1) невідомими є коефіцієнти f , k , ε , всі інші величини повинні бути зафіксовані при проведенні експерименту. Особливість такого роду досліджень полягає в тому, що конструктивні вихідні дані розглядають як так звану чорну скриньку, що не дозволяє аналітично визначити їх раціональні значення. Таким чином, результатом досліджень є довідкові таблиці. Але рівняння (1) може бути використане на підтвердження адекватності фізичного моделювання. Сутність полягає в тому що необхідно підтвердити можливість перерахунку складових формули (1) модельних досліджень на натуральний зразок знаряддя. Єдина можливість це виконати – перевести рівняння (1) в критеріальне. У відповідності до третьої теореми подібності [4]: подібними між собою є явища, у яких умови однозначності подібні і визначальні критерії рівні.

Визначальними є критерії подібності, складені тільки з величин, що входять в умови однозначності.

- У нас відоме рівняння, що описує досліджуване фізичне явище, критерії подібності для цього явища можна отримати, приводячи рівняння до безрозмірного вигляду шляхом введення характерних співвідношень фізичних величин.

$$k_1 = \frac{P}{G \times f} ; k_2 = \frac{P}{k \times a \times b \times n} ; k_3 = \frac{P}{\varepsilon \times a \times b \times V^2} \quad (2)$$

де $k_{1,2,3}$ – критерії подібності, що відповідають складовим рівняння (1)

1.2. Фундаментальні аналітичні моделі

Ряд дослідників [5-7] прийшли до висновку, що проблему визначення тягового опору можна вирішити шляхом диференціації діючих сил. Показовою в цьому плані є математична модель [7].



Сутність моделі полягає в наступному. Робочий орган функціонально поділяється на ріжучий периметр і робочі поверхні. Кромки ріжучого периметру зминають ґрунт і відділяють від загального масиву призму сколу, яка надходить на робочі поверхні. Робочі поверхні кришать і розпушують ґрунт. Поверхні сприймають тиск ґрунту, сили тертя і швидкісний напір. Таким чином загальний тяговий опір має наступні складові.[7]

$$P = P_{СК} + (P_N + P_{ТР} + P_{ЗАТ} + P_V) \cdot \cos \left[\arctg \frac{i \cdot \sin \varphi}{\cos \varphi} - \varphi \right] \quad (3)$$

де $P_{СК}$, P_N , $P_{ТР}$, $P_{ЗАТ}$, P_V , – проекції на напрямок руху відповідно сил сколу призми, нормального тиску ґрунту на поверхню, сили тертя при переміщенні ґрунту вздовж робочої поверхні, додаткова сили від затуплення леза, швидкісної складової опору.

Знайшовши аналітичні вирази для наведених складових в автор [7] прийшов до єдиної інтегральної формули [7, С.76-77] взаємодії з ґрунтом робочого органу довільної геометричної форми.

Наведена залежність не може бути використана безпосередньо для обґрунтування конструктивних параметрів бо працює з приведеними значеннями конструктивних параметрів, але на її основі розроблений ряд прикладних моделей, як то полицевий плуг [7,С.79-83], лапа стрільчаста [7,С. 96], диск борони, луцільника, дискатора [7,С.86-87],

V-подібний глибокорозпушувач [7,С.132-133],

Критеріальне рівняння для інтегрального рівняння буде мати вигляд [7]

$$K_{ПН} = \frac{F_H \cdot g}{C_H \cdot V_H^2 \cdot L_H} = \frac{F_M \cdot g}{C_M \cdot V_M^2 \cdot L_M} = K_{ПМ} \quad (4)$$

де F_M , F_H – Тяговий опір відповідно моделі і натурального зразка корпусу;

C_M , C_H – Питоме счеплення часток модельного середовища і ґрунту;

V_M , V_H – поступова швидкість відповідно моделі і натурального зразка машини;

$K_{ПМ}$, $K_{ПН}$ – критерії подібності моделі і натурального зразка машини

L_M , L_H – Визначальний розмір (ширина захвату) моделі і натурального зразка машини;

Таким чином, розрахункова формула для визначення тягового опору знаряддя буде виглядати наступним чином:

$$F_H = \varepsilon \cdot F_M \cdot \frac{C_H}{C_M} \cdot \frac{V_H^2}{V_M^2} \cdot \frac{L_H}{L_M} \quad (5)$$

де $\varepsilon=0,1$ – узгоджуючий коефіцієнт

На підтвердження адекватності методики наводимо значення тягового опору полицевого плуга-букера отриманого за різними



методиками стосовно ідентичних умов експлуатації.

Польові дослідження – 0,235 кН

Розрахункові значення у відповідності до математичної моделі [7] – 0,38 кН

За результатами фізичного моделювання – 0,290 кН.

Аналіз отриманих значень показує на задовільну збіжність результатів

Оглядом літературних джерел встановлено ще ряд аналітичних моделей взаємодії робочого органу з ґрунтовим середовищем.

Модель [8] В своїй основі має методи аналітичної і нарисної геометрії і побудована на принципі можливих переміщень ґрунтового середовища. Не передбачає визначення якісних і силових показників. Робочий орган, побудований за даними принципами потребує додаткового аналітичного і експериментального відпрацювання.

Модель [5] являє собою модель формоутворення робочої поверхні з урахуванням явища обміну об'ємом між робочим органом і ґрунтом.

Модель [6] Отримані аналітичні залежності визначення конструктивних параметрів робочих органів з точки зору впливу на ґрунт з урахуванням його багатофазної структури та зміни властивостей в процесі деформації Запропоновано загальну схему впливу поверхонь робочих органів на ґрунт з урахуванням його багатофазної структури та зміни властивостей в процесі деформації. Отримані аналітичні залежності конструктивних параметрів робочих органів від механіко-технологічних властивостей середовища. Модель цікава з точки зору механіки твердого тіла, але не може служити основою для прикладної моделі.

1.3 *Моделювання 3D* на наш погляд слід вважати різновидом математичного, бо є результатом його візуальної інтерпретації. Метод дозволяє при наявності адекватної математичної моделі відпрацьовувати конструктивні параметри без прив'язки до оброблюваного середовища, тобто чисто конструктивно.

1.4. *Фізичне моделювання.*

В основі фізичного моделювання лежить теорія подібності. Необхідними умовами фізичного моделювання є геометрична подібність (подібність форми) і фізична подібність моделі і природи. Наявність такої пропорційності дозволяє робити перерахунок експериментальних результатів, одержуваних для моделі, на натуру шляхом множення кожної з визначених величин на постійний для всіх величин даної розмірності множник - коефіцієнт подібності.

Переваги фізичного моделювання полягають в можливості візуального контролю технологічного процесу в реальному масштабі часу і можливості впливати на процес шляхом корегування конструктивних параметрів. Проте необхідно відмітити, що



адекватність процесу залежить від прийнятого критеріального рівняння, яке в свою чергу визначається адекватністю математичної моделі. Складність також полягає в тому, що фізична модель ґрунтового середовища повинна відповідати його математичній моделі

1.5. Біоніка

Біоніка - розділ кібернетики, пов'язаний з побудовою технічних пристроїв і систем, а також з рішенням різних інженерних задач на основі вивчення функціонування органів і систем живої природи.

Застосування методів біоніки потребує наявності біологічного аналогу, який був би функціонально подібним розроблюваному знаряддю. Від ступеня подібності залежить і ступінь адаптації робочого органу до конкретних умов його експлуатації. Вся складність полягає в тому, що сліпе копіювання аналогу нічого не дає. Робочий орган працює в інших умовах і для його розробки необхідна математична модель аналогу, але пристосовно до конкретних умов використання, а це вже складна задача.

В галузі використання методів біоніки можна виділити дві наукові школи: Л.Ф. Бабицького[9] і Дніпровського державного аграрно-економічного університету (ДДАЕУ) Обидві школи використовують метод функціональних аналогій: конструкція аргументується з точки зору можливості виконання технологічного процесу на основі зовнішньої функціональної подібності робочого органу і біологічного аналогу. Різниця полягає в тому, що в першому випадку модель є аналоговою, тобто вона є масштабованою копією тіла біологічного аналогу. В другому цифровою: параметри аналогу оцифровують, розробляють регресійне рівняння яке закладається в математичну модель взаємодії з ґрунтовим середовищем, що дозволяє виконати адаптацію моделі до конкретних умов експлуатації. В якості аналогового моделювання можна привести конструкцію зуба ротаційної зубової борони [10] якості цифрового – стрільчасту лапу [11].

1.6. Допоміжні види моделювання.

1.6.1. Аналіз розмірностей

Суть методу полягає в тому, що з параметрів, які характеризують систему, складається вираз-модель, що має потрібну розмірність і певним чином відтворює функціонування фізичної системи. Метод дозволяє отримати безрозмірний вираз, що є основою розробки критерія подібності.

1.6.2. Аналогове моделювання

Аналогове моделювання – це метод моделювання, заснований на аналогії або ізоморфізмі явищ, що мають різну фізичну природу, але описуються однаковими математичними (диференціальними, алгебраїчними або будь-якими іншими) рівняннями. Тобто у разі



однакових критеріальних рівнянь метод може бути застосований.

На даний момент відомі два види аналогового моделювання – це гідродинамічне і електродинамічне.

В основу методу гідродинамічного моделювання закладена функціональна подібність складових рівняння Бернуллі і В.П. Горячкіна:

Повний гідродинамічний напор – тяговий опір знаряддя; Висотне положення перетину – опір на ухил місцевості; Втрати напору по довжині – опір на перекочування

Як і при фізичному моделюванні методичну основу складають критерії подібності. Головний з них – критерій (число) Ейлера, Характеризує співвідношення між силами тиску, що діють на елементарний об'єм і енергійними силами

$$Eu = \frac{2(p_2 - p_1)}{\rho v^2} \quad (6)$$

де p_2, p_1 – тиск в двох характерних точках потоку;

$\rho v^2/2$ – швидкісний напор;

v – швидкість потоку;

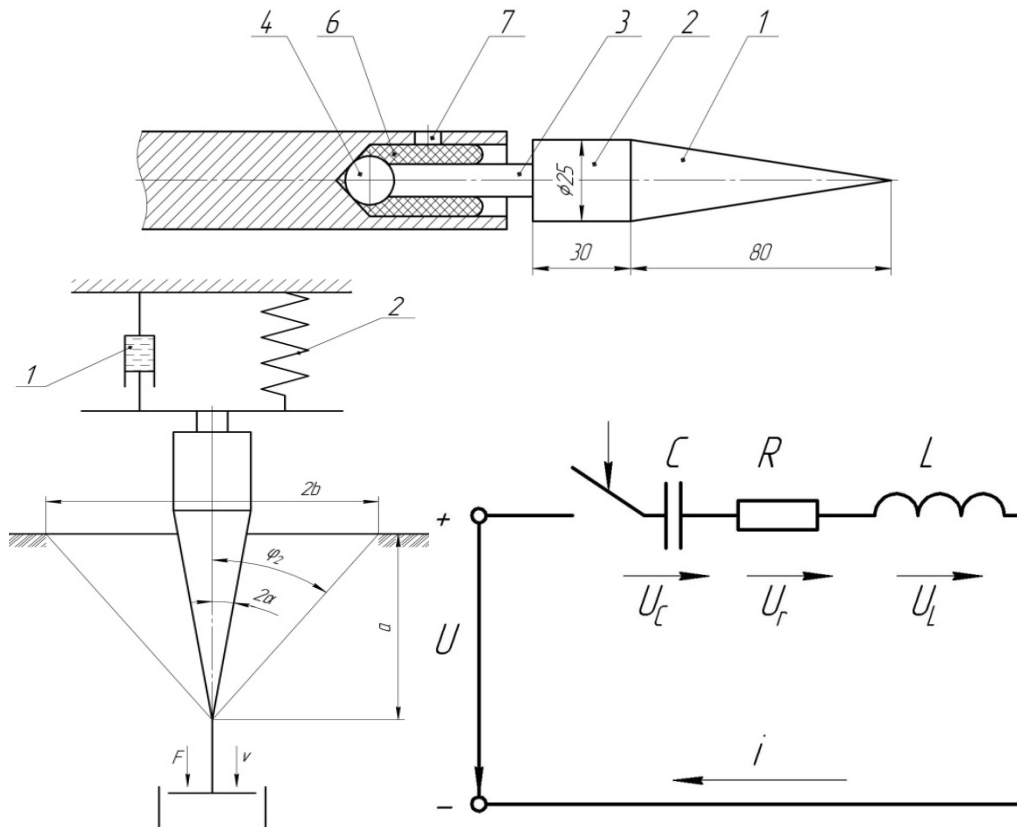
ρ – щільність рідини допоміжні критерії: поелементне співвідношення складових рівнянь.

Методика гідродинамічних досліджень детально відрацьована ДДАЕУ. Для гідродинамічних досліджень використовується заповнений рідиною гідравлічний лоток. Модель робочого органу навішується на візок, який переміщується по рейкам вздовж лотка. По периметру робочого органу врізані датчики тиску з метою підвищення чутливості, модель виконується у масштабі збільшення.

Метод має ряд суттєвих недоліків Головний з них – це те, що рідина не має кута внутрішнього тертя в тому понятті, що прийняте в землеробській механіці. Тому критерії подібності необхідно штучно приводити до безрозмірної величини, що вносить похибку в кінцевий результат.

В основу методу електродинамічного моделювання закладена подібність рівнянь, що описують закономірності взаємодії з ґрунтом робочого органу і рівняння перехідного процесу електричного ланцюга.

Найбільш наочно методику можна відстежити на пружній голці ротаційної дискової борони [10], рис. 3.



a – схема конструктивна [10]: 1 – наконечник, 2 тіло голки, 3 – хвостовик, 4 – опора, 6 – пружний елемент, 7- технологічний отвір; *б* – модель реологічна : 1 демпфер, 2 – пружний елемент. *в* – модель електродинамічна

Рисунок 3. Експериментальна голка ротаційної зубової борони:

В землеробській механіці загальноприйнятим є визначати заглиблюючу силу робочих органів, які потребують примусового заглиблення через приведену вагу машини [3] на 1,0 м, або на один робочий орган. Тому, рівняння руху механічної системи, рис.3,б має вид:

$$F = F_1 + F_2 = m (dv/dt),$$

де F – занурююча сила;

F_1 – пружна сила;

F_2 – демпферна сила.

v – швидкість занурення;

m – приведена маса на одну голку.

Таким чином, для механічної системи :

$$F = k_1 \cdot x + k_2 v + m (dv/dt) \quad (7)$$

де x – величина абсолютного переміщення голки;

Для електричного ланцюга рівняння перехідного процесу:



$$U = u_c + u_r + u_L = (1/C) \int i dt + ir + L(di/dt) \quad (8)$$

З порівняння рівнянь (7) і (8) витікає, що діюча напруга U , є аналогом сили F , напруга u_c на ємності є аналогом пружної сили пружини, ток i є аналогом швидкості v , u_r — аналог демпферної сили. індуктивність L — аналогом доведеної маси тіла m .

Таким, чином, обидва процеси описують подібні рівняння, що відповідає вимогам аналогового моделювання.

Висновки

1. Розробка ґрунтообробного робочого органу і машини на його основі може розглядатись як послідовність модельних досліджень.

2. Існує значна кількість видів моделювання, які можуть бути застосованими на проектному етапі розробки ґрунтообробних машин. Найбільш раціональним є сумісне використання двох, максимум трьох видів. Використання більшої кількості призводить до ускладнення досліджень і може бути використаним в детально обґрунтованих випадках.

3. З усіх видів моделювання тільки прикладне математичне є достатній мірі відпрацьованим.

Список використаних джерел

1. Basch G. Green Carbon: Making sustainable agriculture real. *European Conservation Agriculture Federation (ECAAF)*. Brussels, Belgium. 8–74, 2014.

2. Van Muysen W., Govers G., Van Oost K. Identification factors in the process of tillage erosion: the case of mouldboard tillage. *Soil Tillage Res.*, 2002; Vol. 65, N 1, P. 77–93.

3. Кобець А. С. Землеробська механіка. Кобець А. С., Сокол С. П., Пугач А. М., Дирда В. І., Волик Б. А., Тищенко С. С., Гаврильченко О. С. Дніпро, Пороги, 2022 408 с.

4. Alabuzhev P. M., Heronimus V. B. (1968) *Teoriya podobyia y razmernosti. Modelirovaniye*. [Theory of similarity and dimensions. Modeling] М.: Vysshaia shkola, 208 p. URL: <https://www.twirpx.com/file/2272710/>

5. Ветохін В. І. Системні та фізико-механічні основи проектування розпушувачів ґрунту :автореф. дис... д-ра техн. наук / В. І. Ветохін; ННЦ ІМЕСГ. – Глеваха, 2010. 40 с.

6. Мударисов С. Г. Повышение качества обработки почвы путем совершенствования рабочих органов машин на основе моделирования технологического процесса: Автореф. дис... докт. техн.



наук: 05.20.01. Челябинск, 2007. 40с.

7. Панченко А. Н. Теория измельчения почв почвообрабатывающими орудиями. А. Н. Панченко. Днепропетровск: ДГАУ, 1999. 140 с.

8. Тищенко С. С. Основы проектирования адаптивных поверхностей рабочих органов для дифференциации процессов обработки почвы: автореф. дис... докт. техн. наук: 05.05.11 Киев, 2011. 40 с.

9. Бабицький Л.Ф. Біонічні напрями розробки ґрунтообробних машин. К.: Урожай, 2008. 164 с.

10. Volyk B.A., Lepet Ye.I., Konovij A.V. Justification of the design of the rotary tooth harrow based on the analysis of the body structure of the biological analogue / Suchasni stan ta perspektyvy rozvytku aharnoho sektoru Ukrainy: Zb. Naukovykh prats (30 lystopada 2018, m. Nizhyn) / Za nauk. Red. V.S. Lukacha [ta in.]. Nizhyn, 2018 P. 34–41

11. Михайлов Є. В. Обґрунтування конструктивної схеми стрільчастої лапи на основі біологічного прототипу. / Є. В. Михайлов, Б. А. Волик, Г. В. Теслюк, А. В. Коновий. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Мелітополь 2019. Вип. 19, т.3. С.37–46 DOI:10.31388/2078-0877-19-3-37-45

Стаття надійшла до редакції 21.02.2023 р.

B. Volyk, H. Tesliuk, A. Konovij, E. Lepet'
Dnipro State Agrarian and Economic University

ANALYTICAL REVIEW OF MODELING METHODS OF SOIL PROCESSING MECHANISMS

Summary

The article discusses the general principles of development of tillage tools. It is shown that all stages of development and design of machines as a whole represent a consistent system of model studies.

The possibilities of each type of modeling were analyzed, including in the case of joint use. Reasonable prospect of involvement in the process of development of bionics and physical modeling methods. A necessary condition for the functioning of both models is the presence of an adequate mathematical model of interaction with the soil. In the case of bionic research, the mathematical model allows for adaptation to the soil environment, in the case of physical research, it is possible to determine rational similarity criteria. The theory of internal stress is used as the basis of analytical studies, which in turn is synthesized on the basis of analog and simulation modeling of the soil environment. The possibility of involving basic applied models of agricultural mechanics as a basis for research is analyzed.

For analytical studies of tools under development, it is advisable to separate and consider the cutting perimeter and working surfaces separately in the working body, regardless of the type of model studies. As an example, the work presents variants of the



arrowhead of the cultivator, the design of which is based on various types of modeling.

It should be noted that none of the models allows to obtain the predicted qualitative indicators of crumbling and loosening. However, the degree of crushing can be indirectly estimated through the volume of the chipped prism and the amount of traction resistance.

The results of experimental studies are presented. If all methodological requirements are met, it is possible to achieve convergence of research results within 10-15%.

Key words: model studies, bionics, physical modeling, adaptation to the environment, criterion of similarity. Criteria of design rationality.