



DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-1-104-115

УДК 662.767.2

О. Г. Скляр<sup>1</sup>, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-0456-2479

Р. В. Скляр<sup>1</sup>, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-1547-5100

А. С. Комар, інженер

ORCID: 0000-0001-7037-8402

<sup>1</sup> Таврійський державний агротехнологічний університет

імені Дмитра Моторного

e-mail: [radmila.skliar@tsatu.edu.ua](mailto:radmila.skliar@tsatu.edu.ua), тел.: +380679168580

## ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ МОДЕЛЮВАННЯ МАШИННОЇ ТЕХНОЛОГІЇ УТИЛІЗАЦІЇ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ

*Анотація.* В статті розглянуті теоретичні аспекти моделювання машинної технології утилізації органічних відходів. Для опису такої системи у вигляді інформаційної моделі було використано структурно-параметричну схему функціонування технології. Метод проектування технологій та засобів, що мають найбільшу ефективність у заданих умовах, заснований на математичній моделі або ієрархії моделей, що адекватно описує проєктований процес та дозволяє за допомогою сучасних обчислювальних засобів поєднати процеси постановки та вирішення задачі. Для цього запропоновано модель, основним показником якості якої, прийнято кількість азоту в одній тонні готового органічного добрива щодо вмісту азоту у вихідному гною та посліді. В роботі для вирішення задачі визначення динаміки збереженості азоту використано логіко-лінгвістичний метод формалізації моделей нечітких багатовимірних систем. Огляд методів та моделей для формування та вибору технологій і комплексів технічних засобів, дозволив обґрунтувати метод проектування технологій утилізації гною та посліду.

*Ключові слова:* гній, послід, математична модель, метод, проектування, тварина, технологічний процес, добриво.

*Постановка проблеми.* Розробка методу проектування технологій утилізації гною та посліду є складною багатоплановою задачею [1, 2].

При формуванні та виборі технологій утилізації гною [3-6] найбільш ефективно виходити з умови біологічного обороту поживних речовин, який полягає в отриманні екскрементів від тварин, нормалізації їх складу, що забезпечує активізацію мікрофлори ґрунту та харчування сільськогосподарських рослин, при активному впливі на систему зовнішніх впливів. Зовнішніми впливами є господарські умови, технології, що застосовуються, які складаються з процесів та операцій, а також технічні засоби для виконання операцій.

*Аналіз останніх досліджень.* Питаннями прийняття рішень на основі математичних моделей присвячена численна література,



зокрема роботи вчених А. Г. Аганбегяна, А. М. Бондаренко, Є. С. Вентцель, А. М. Валге, Л. В. Канторовича, Р. О. Трибрата, Г. С. Поспелова, П. М. Павленко, Н. П. Федоренко та ін. [7-10].

Незважаючи на спільність розв'язуваної задачі, розроблені математичні моделі оптимізації складу, структури та використання засобів технічної оснащеності сільського господарства мають низку суттєвих відмінностей.

Усі математичні моделі можна умовно розділити на аналітичні та статистичні [11, 12]. У першому випадку основні кількісні показники процесів (технологічних операцій) пов'язуються аналітичними залежностями. Система цих рівнянь і є аналітичною моделлю. Під час розробки статистичних моделей (імітаційні моделі, модель Монте-Карло) виходять із того, що виробничим діям природньо властивий елемент випадковості, що вони не є детермінованими, а підпорядковуються законам розподілу випадкових величин (статистичні моделі дозволяють досліджувати систему будь-якого типу) [13]. Можливість урахування нелінійності, динаміки, імовірнісної природи деяких явищ дозволяє зробити статистичну модель адекватної дійсності і, досліджуючи її, здійснювати так званий натурний експеримент у прискореному масштабі часу [14-16].

*Формулювання мети статті.* Обґрунтувати метод проектування технологій утилізації гною та посліду за допомогою огляду методів та моделей для формування та вибору технологій і комплексів технічних засобів.

*Основна частина.* Для формування будь-якої технології необхідно прийняти наступні передумови [17, 18]:

- на всіх етапах впливу як предмет праці виступає один і той ж продукт – екскременти тварин, фізико-механічні, мікробіологічні, агрохімічні та санітарно-гігієнічні властивості яких змінюються цілеспрямовано у бік необхідних ґрунтом кінцевих показників;
- початковий стан предмета праці – екскрементів для всіх видів органічних добрив має той самий вектор стану, який визначається спеціалізацією підприємства та системою видалення екскрементів;
- вид добрива, одержуваного у процесі переробки екскрементів, визначається агрохімічними, фізико-механічними, санітарно-гігієнічними та іншими вимогами рослин, ґрунтової мікрофлори, а також екологічними вимогами довкілля.

Вихідний гній, послід під впливом операцій, технологічних процесів та технічних засобів, поєднання яких обумовлено технологією, перетворюються на органічні добрива та очищену рідину (при використанні технологій глибокої переробки) відповідно до фаз їх перетворень [19, 20].

Для опису такої системи у вигляді інформаційної моделі [21]

може бути використано структурно-параметричну схему функціонування технології, представлену на рис. 1.

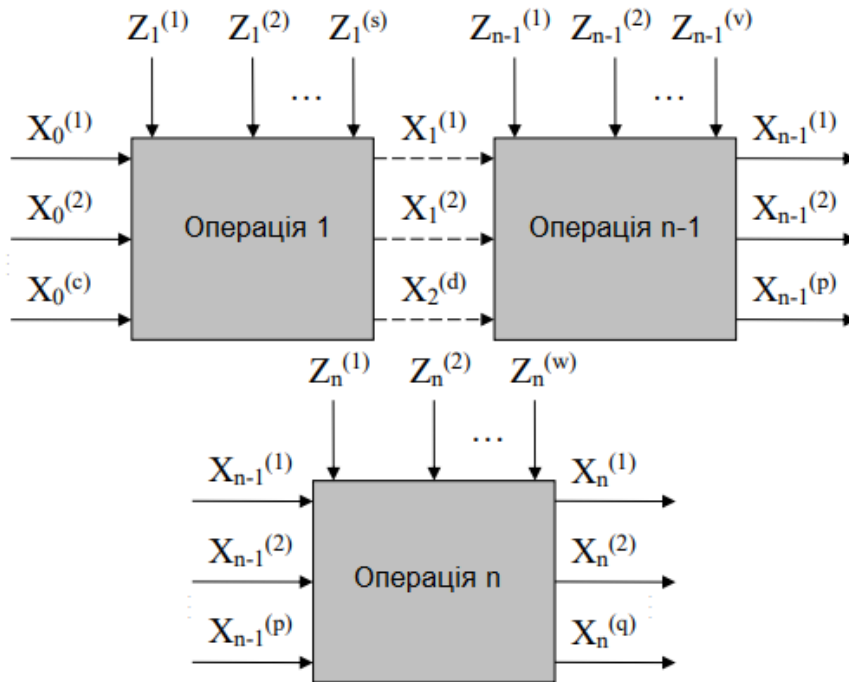


Рис. 1. Структурна схема багатовимірнього багатоланкового технологічного процесу

Допустимо досліджуваний процес складається з  $n$  багатовимірніх операцій. На вході процесу діють випадкові величини  $X_0$ , а вихід першого процесу має випадкові величини  $X_1$ , які є входами для іншого процесу і так далі. Вихід всього технологічного процесу характеризується випадковими величинами  $X_n$  [21].

На якість готових органічних добрив та одержуваної очищеної рідини впливають як параметри вихідного матеріалу, так і параметри технічних засобів [22]. На кожній операції діють випадкові фактори  $Z_1, Z_2$  тощо.

Щільності ймовірності всіх випадкових величин та їх спільних розподілів передбачаються нормальними.

Математичне очікування будь-якого з виходів визначається на підставі багатопараметричного рівняння

$$\begin{aligned}
 M \{ X_1^{(i)}, \dots, X_{n-1}^{(l)}; Z_1^{(h)}, \dots, Z_n^{(v)} \} = & \\
 = A + \sum_{i=1}^c a_i x_0^i + \dots + \sum_{l=1}^p f_l x_{n-1}^{(l)} + \sum_{h=1}^s d_h z_1^{(h)} + \dots & \\
 + \sum_{v=1}^w \varphi_v z_n^{(v)} &
 \end{aligned}$$



Коефіцієнти рівнянь мають бути визначені на підставі моделювання на ПЕОМ з математичних моделей [21, 23].

Вихід системи визначає векторна функція  $X_n$ , яка включає економічні, техніко-економічні та екологічні показники ефективності функціонування системи.

Модель багаторівневого процесу технологічного проектування з пороговими відборами рішень на кожному рівні характеризується високою ефективністю, тому що користувач на кожному етапі проектування має можливість відібрати кілька варіантів найближчих до найкращого варіанту. На останній стадії проектування вибирається один остаточний варіант, який, на думку користувача, ґрунтуючись на його кваліфікації та компетентності, відповідає критерію якості.

Процес проектування включає наступні, послідовно здійснені етапи [23]:

1. Обстеження господарства, для якого обирається технологія.
2. Збір та класифікація вихідних даних про виробничі умови.
3. Порівняння вихідних даних з обмеженнями застосування технології, що містяться в блоці баз даних ПЕОМ.
4. Формування технології утилізації гною, посліду та її варіантів з обліком умов господарства.
5. Прийняття рішення про можливість вибору технології із заданими вихідними параметрами для умов даного господарства.

Алгоритми вибору раціональних варіантів технологічних процесів складені у формі імплікацій.

Наукова основа формування технологій – метод проектування технологій та засобів, що мають найбільшу ефективність у заданих умовах, заснований на математичній моделі або ієрархії моделей, що адекватно описує проєктований процес та дозволяє за допомогою сучасних обчислювальних засобів поєднати процеси постановки та вирішення задачі.

Для вибору ефективних технологій утилізації гною і посліду застосовуються методи, яких на сьогоднішній день безліч і які мають лише модельні приклади [21, 23].

При формалізованому описі системи утилізації гною, посліду з отриманням органічних добрив виходили з того, що задача дослідження технологій може бути представлена як двоточкова, що формується наступним чином: необхідно перевести систему з деякого початкового стану  $X_0$  в кінцевий стан  $X_m$  за часовий інтервал  $T$  при впливах на вектор керування. Модель отримання органічних добрив у загальному вигляді представлена рис. 2.

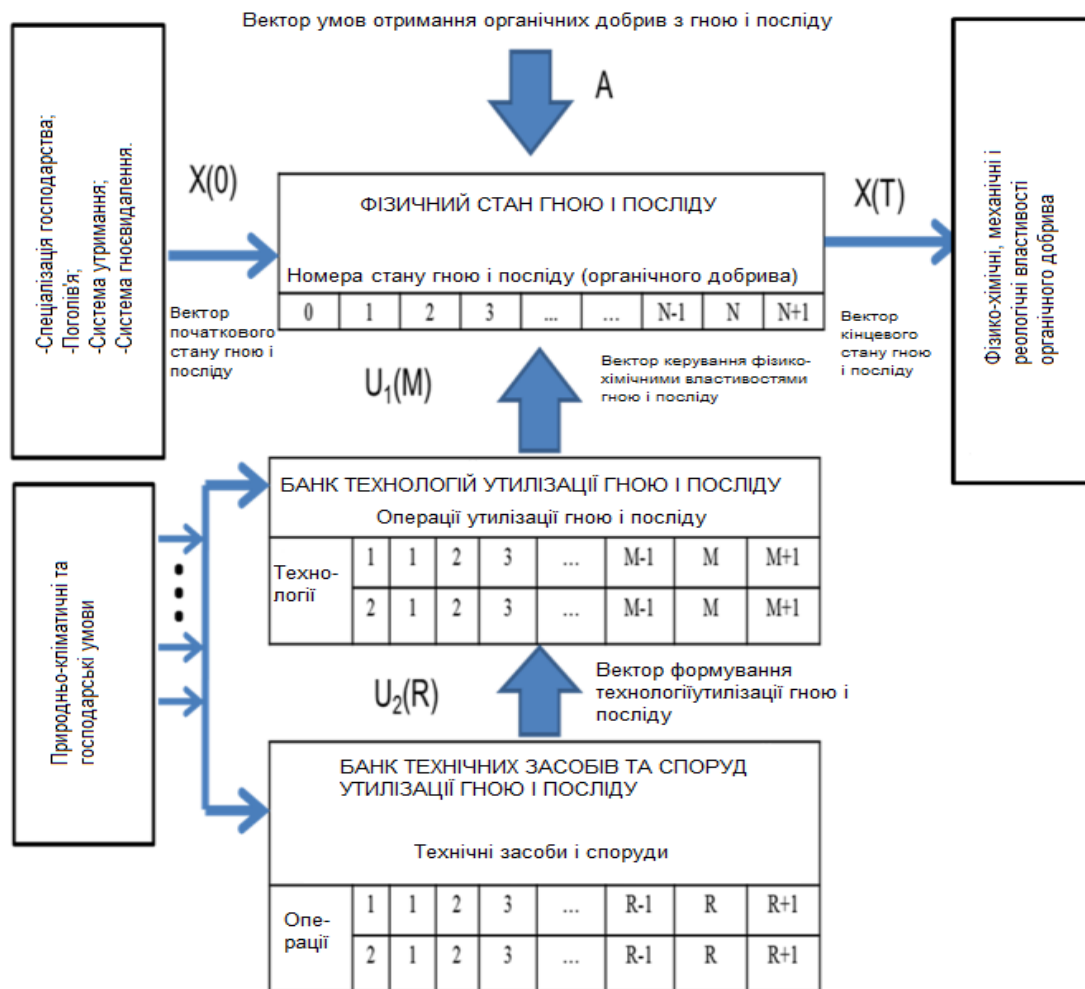


Рис. 2. Модель отримання органічних добрив у загальному вигляді

Для формування технології прийнято такі передумови [23, 24]:

- при утилізації гною та посліду на всіх її етапах як предмет праці виступає той самий продукт – гній, послід, фізико-хімічні властивості якого змінюються цілеспрямовано у бік необхідного кінцевого показника;

- початковий стан гною, посліду  $X_0$  для всіх видів органічних добрив має один і той же вектор стану, який визначається його станом на момент виходу з приміщення для утримання тварин;

- вид одержуваного органічного добрива внаслідок використання технологій визначається вектором кінцевого показника фізико-хімічних властивостей, отриманого з гною, посліду, органічного добрива в стані  $X_T$ .

Вектор стану гною, послід розвивається як у просторі визначальних його координат, так і в часовому інтервалі, обумовленому біохімічними процесами, що відбуваються при утилізації. Як основні складові вектору стану системи прийнято фізико-хімічні показники при зміні станів вектору з  $x_i$  в  $x_{i+1}$ .



Система переходить зі стану  $x_i$  до стану  $x_{i+j}$  під впливом керування  $U_1(i,j)$ , де  $i$  - номер технології,  $j$  - номер операції у технології.

Вектор керування  $U_1$  складається з безлічі технологій  $M$ , якими визначається як вид органічного добрива, так і основні його показники в кінці тимчасового інтервалу та завершальної операції  $N$ , вектору  $X_T$ .

Кожна з технологій складається з безлічі операцій, для виконання яких використовуються різні технічні засоби (множини  $U_2$ ). Складом технічних засобів визначається обрана технологія утилізації гною, посліду та вид органічного добрива.

Реальні виробничі процеси протікають у конкретних умовах, обумовлених впливом безлічі факторів, основними з яких є фактори, що впливають на протікання біохімічних процесів у перероблюваному гною, посліді та готових органічних добривах [6, 20, 25]. У запропонованій моделі вектор умов отримання органічних добрив з гною, посліду  $A$  впливає на вектор стану гною, посліду  $X$ . Вектор умов складається з безлічі детермінованих і випадкових складових. Характер їх впливу значною мірою залежить від умов конкретного виробництва та системи утримання тварин.

У загальному вигляді математична модель утилізації гною, посліду та отримання органічних добрив може бути записана у вигляді співвідношення

$$X_T = A_M X_0 + F_1 [U_1 = F_2(U_2)A],$$

де  $F_1, F_2$  - вектор керування станом гною, посліду;

$U_1$  - технологія як вектор керування станом гною, посліду;

$U_2$  - технічні засоби як вектор керування станом гною, посліду;

$A$  - вектор умов отримання органічних добрив із гною, посліду;

$X_0$  - початкове значення вектору стану гною, посліду;

$X_T$  - кінцеве значення вектору стану гною, посліду;

$T$  - тимчасовий інтервал утилізації гною, посліду;

$A_M$  - матриця вектору постійних або змінних значень факторів, що впливають на умови отримання органічних добрив, представлена виразом

$$A_M = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{vmatrix}$$

Складовими векторів моделі є показники, прийняті для оцінки технологій утилізації гною, посліду та окремих операцій. Об'єкт керування  $X$  ( $Q, W_n, W_{добр}, K_n, K_{добр}, f_{обр}, f_{вн}, Z_{пит.}^k, Z_{пит.}^e$ ) характеризується поточним станом гною, посліду (органічних добрив) та містить такі складові:



$Q$  – маса гною, посліду, т;

$W_n$  – вологість гною, посліду, відс.;

$W_{добр}$  – вологість органічного добрива, відс.;

$K_n$  – вміст поживних речовин у вихідному гною, посліді, відс.;

$K_{добр}$  – вміст поживних речовин у готовому органічному добриві, відс.

$f_{обр}$  – втрати азоту у процесі обробки гною, посліду, у частках одиниці;

$f_{вн}$  – втрати азоту при внесенні органічних добрив, у частках одиниці;

$Z_{пит.}^k$  – питомі капітальні витрати на 1 т вироблених та внесених органічних добрив, грн./т.

$Z_{пит.}^e$  – питомі експлуатаційні витрати на 1 т вироблених та внесених органічних добрив, грн./т.

Таким чином, процес утилізації гною та посліду є складною багатопараметричною системою, модель функціонування якої має багатоступінчасту структуру, що включає моделі окремих процесів і явищ та їх взаємозв'язків, і враховує умови отримання органічних добрив [6, 20, 25].

Вектор умов отримання органічних добрив із гною та посліду характеризує поєднання факторів, що впливають на якість одержуваних органічних добрив. У запропонованій моделі основним показником якості прийнято кількість азоту в одній тонні готового органічного добрива щодо вмісту азоту  $N$  у вихідному гною, посліді. Інші показники якості органічних добрив, такі як відсутність патогенної мікрофлори, гранулометричний склад тощо, виступають як обмеження.

Фактори, що впливають на збереження азоту в процесі утилізації гною та посліду [25], показані у вигляді інформаційної моделі, представленої на рис. 3:

$Q_N^1$  – кількість  $N$  доведеної до рослини;

$Q_N$  – кількість  $N$  у свіжому гною (посліді);

$W$  – вологість гною, посліду;

$C/N$  – співвідношення вуглецю до азоту у вихідному гною/посліді;

$T_{тех}$  – інтенсивність технології (час переробки, температурний режим, кількість технологічних операцій);

$T_{вн}$  – технологія внесення (кількість технологічних операцій, час від моменту розподілу добрив до закладення в ґрунт);

$q$  – якість виконання технологічних операцій;

$N_a$  – природно-кліматичні умови.

Поєднання факторів, що впливають, повинно забезпечувати:

$Q_N^1 \rightarrow \max.$

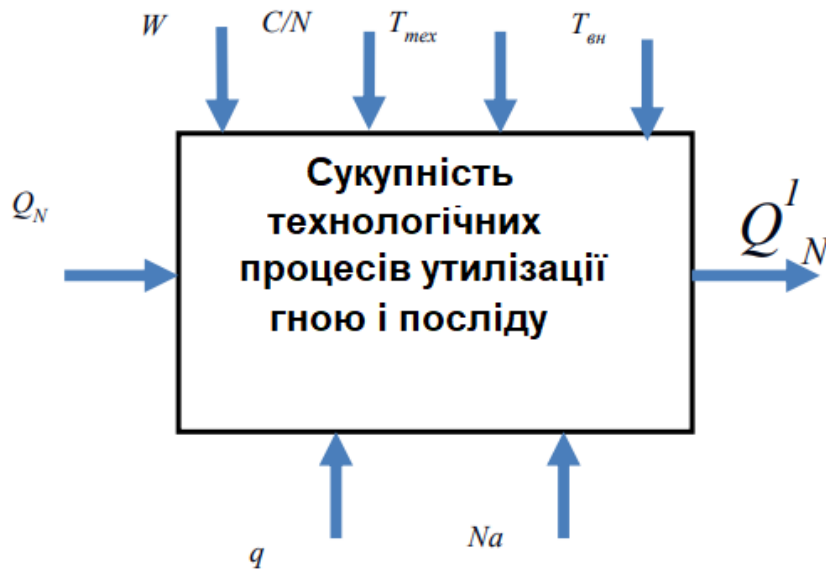


Рис. 3. Інформаційна модель впливу факторів на збереження азоту

При цьому на всі фактори, крім  $N_a$ , можна впливати, тобто, керувати.

До цього часу комплексних досліджень з визначення залежності динаміки збереженості азоту від перерахованих вище факторів та їх поєднання не проводилося. Основною причиною цього була складність і висока вартість проведення експериментальних досліджень, відсутність методів формалізації та кількісного подання якісних інформаційних компонентів, та, крім того, складність та апріорна невизначеність процесів, явищ та взаємодій, що протікають у процесі утилізації гною та посліду.

Для вирішення задачі визначення динаміки збереженості азоту в даній роботі запропоновано логіко-лінгвістичний метод формалізації моделей нечітких багатовимірних систем [23].

Огляд методів та моделей для формування та вибору технологій і комплексів технічних засобів, дозволив обґрунтувати метод проєктування технологій утилізації гною та посліду, що представлено на рис. 4.

На першому етапі проводиться науковий аналіз та формалізований опис системи, що розкриває особливості алгоритму її функціонування та характер взаємодії вхідних та вихідних показників.

Другий етап передбачає розробку математичної моделі. Для великих багатопараметричних систем це, як правило, комплекс математичних моделей різного виду, що забезпечують моделювання процесів системи в цілому та окремих її складових, а також взаємозв'язку між ними.

На третьому етапі обґрунтовуються критерії оцінки, які враховують усі основні показники об'єкта.





Рис. 4. Основні блоки методу проєктування технологій утилізації гною та посліду

Четвертим етапом є збір та обробка інформації про умови функціонування системи. У разі це побудова моделей оцінювання збереженості азоту залежно від діючих чинників.

П'ятий етап, що передбачає формування технологій та комплексів технічних засобів у діалоговому режимі. При цьому алгоритмічному та програмному забезпеченню відводяться функції оперативного розрахунку елементів системи з урахуванням розроблених математичних моделей.

На наступних етапах проєктування здійснюється аналіз результатів проєктування та перевірки адекватності математичних моделей.

*Висновки.* Огляд методів та моделей для формування та вибору технологій та комплексів технічних засобів, дозволив обґрунтувати метод проєктування технологій утилізації гною та посліду.

*Список використаних джерел.*

1. Groenestein C. M., Valli L., PiñeiroNoguera C., Menzi H., Bonazzi G., Döhler H., Van der Hoek K., Aarnink A. J. A., Oenema O., Kozlova N., Kuczynski T., Klimont Z., Montalvo Bermejo G. Livestock housing. Options for Ammonia Mitigation Guidance from the UNECE Task Force on Reactive Nitrogen. Edinburgh, 2014. P. 14-25.
2. Optimized Gravitational Settling of Hog Manure Solids: *Engineering and Design Study, DGH Engineering Ltd.* 12 Aviation Boulevard, St. Andrews, Manitoba R1A 3N5 October, 2013.
3. Singh P., Gamal El-Din M., Bromley D., Ikehata K. Alum settling and filtration treatment of liquid swine manure *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 2006. Vol. 49(5). P. 1487–1494.
4. Smet E., Debruyne J., Deckx J., Deboosere S. Manure treatment according to the Trevi concept. *Forum for Applied Biotechnology*. September, 2003.
5. Jakubowski T. Analysis of waste processing technologies by composting method. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матер. III Міжнар. наук.-практ. конф. Мелітополь: ТДАТУ, 2021. С. 118–122.*
6. Skliar A., Skliar R. Justification of conditions for research on a laboratory biogas plant. *MOTROL: Motoryzacja I Energetyka Rolnictwa*. 2014. Vol. 16(2). P. 183–188.
7. Павленко П. М., Філоненко С. Ф., Чередніков О. М., Трейтяк В. В. Математичне моделювання систем і процесів: навч. посіб. Київ: НАУ, 2017. 392 с.
8. Трибрат Р. О. Моделювання технологічних процесів у тваринництві: метод. рекомендації до самостійного вивчення дисципліни. Миколаїв: МНАУ, 2016. 47 с.
9. Uvarov R., Briukhanov A., Shalavina E. Study results of mass and nutrient loss in technologies of different composting rate: case of bedding poultry manure. *Engineering for rural development Proceedings*. 2016. P. 851–857.
10. Wiegers K. E. Software Requirements. 2-nd edition. Redmond: Microsoft Press, 2008. 516 p.
11. Томашевський В. М. Моделювання систем: підруч. для студ. ВНЗ/ за заг. ред. М. З. Згуровського. Київ: Видавнича група ВНЗ, 2008. 352 с.
12. Кігель В. Р. Математичні методи ринкової економіки. Київ: Кондор, 2008. 212 с.
13. Скляр Р. В. Основні принципи побудови та аналіз математичних моделей технологічних процесів. *Молодь і технічний прогрес в АПК: матер. Міжнар. наук.-практ. конф.. Харків: ХНТУСГ, 2021. С. 263–266.*



14. Григоренко С. М. Моделювання та оптимізація річного обороту стада великої рогатої худоби. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2021. Вип. 11, т. 2. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2021-2-13>.

15. Болтянський Б. В. Моделювання та оптимізація раціону годування дійних корів у зимовий період. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2022. Вип. 12, т. 1. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2022-1-5>.

16. Григоренко С. М. Методика моделювання та оптимізації структури посівних площ. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2023. Вип. 13, т. 1. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2023-1-7>.

17. Комар А. Definition of priority tasks for agricultural development. *Multidisciplinary research: Abstracts of XIV International Scientific and Practical Conference*. Bilbao, Spain, 2020. P. 431–433.

18. Болтянський Б. В. Модель функціонування бази технічного сервісу обладнання тваринницьких підприємств. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2022. Вип. 12, т. 3. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2022-1-12>.

19. Болтянський Б. В. [та ін.]. Енерго- та ресурсозбереження в тваринництві: підручник. Київ: Кондор, 2020. 410 с.

20. Skliar O. Directions of increasing the efficiency of energy use in livestock. *Current issues of science and education: Abstracts of XIV International Scientific and Practical Conference*. Rome, 2021. P. 171–176.

21. Скляр Р. В. Доцільність використання економіко-математичних моделей в сільському господарстві. *Інноваційні технології в АПК: матер. VII Всеукр. наук.-практ. конф.* Луцьк: Луцький НТУ, 2021. С. 122-124.

22. Boltianskyi B., Boltianska L., Dereza S., Grigorenko S., Syrotyuk S., Jakubowski T. The Process of operation of a mobile straw spreading unit with a rotating finger body-experimental research. *Processes*. 2021. Vol. 9(7). P. 1144.

23. Скляр О. Г., Скляр Р. В., Комар А. С. Огляд методів дослідження та оптимізації машинних технологій утилізації відходів тваринництва. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2023. Вип. 13, т. 2. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2023-2-9>.

24. Shokarev O., Komar A. State and problems of implementation of innovations in the field of animal husbandry. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2022. Вип. 12, т. 2. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2022-2-5>.

25. Скляр О. Г., Скляр Р. В. Біоконверсні технології прискореної переробки відходів тваринництва в екологічно безпечні добрива. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2021. Вип. 11, т. 2. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2021-2-3>.

*Стаття надійшла до редакції 13.09.2023 р.*



O. Skliar<sup>1</sup>, R. Skliar<sup>1</sup>, A. Komar<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dmytro Motornyi Tavria State Agrrotechnological University

## THEORETICAL ASPECTS OF MODELING OF MACHINE TECHNOLOGY OF ORGANIC WASTE DISPOSAL

### *Summary*

The article deals with the theoretical aspects of modeling the mechanical technology of organic waste disposal. To describe such a system in the form of an information model, a structural-parametric diagram of the functioning of the technology was used. The model of the multi-level process of technological design with threshold selection of solutions at each level is characterized by high efficiency, because the user at each stage of the design has the opportunity to select several options closest to the best option. At the last stage of design, one final option is selected, which, according to the user, based on his qualifications and competence, meets the quality criterion. The method of designing technologies and tools that have the greatest efficiency in given conditions is based on a mathematical model or a hierarchy of models that adequately describes the designed process and allows using modern computing tools to combine the processes of setting and solving the problem. For this, a model was proposed, the main quality indicator of which is the amount of nitrogen in one ton of finished organic fertilizer in relation to the nitrogen content in the original manure and litter. Until now, comprehensive studies on the dependence of the dynamics of nitrogen conservation on the factors listed above and their combination have not been conducted. The main reason for this was the complexity and high cost of conducting experimental research, the lack of methods of formalization and quantitative presentation of qualitative information components, and, in addition, the complexity and a priori uncertainty of processes, phenomena and interactions occurring in the process of utilization of manure and litter. In the paper, the logico-linguistic method of formalizing models of fuzzy multidimensional systems was used to solve the problem of determining the dynamics of nitrogen conservation. The review of methods and models for the formation and selection of technologies and complexes of technical means allowed to substantiate the method of designing technologies for the utilization of manure and droppings.

**Keywords:** manure, droppings, mathematical model, method, design, animal, technological process, fertilizer.