

УДК 631.8: 004.4

АВТОМАТИЗАЦІЯ І ОПТИМІЗАЦІЯ ПІДБОРУ ДОБРИВ ЗА БАЛАНСОВИМ МЕТОДОМ

М.І. РОМАЩЕНКО, док. тех. наук,

Т.В. МАТЯШ, канд. тех. наук,

В.П. КОВАЛЬЧУК, док. тех. наук,

Н.В. СОРОКА

Інститут водних проблем і меліорації НААН

В.О. БОГАЄНКО, канд. тех. наук,

Інститут кібернетики НАНУ

У статті запропоновано підхід до автоматизації процесу підбору добрив за компонентами балансовим методом по виносу поживних речовин рослинами з ґрунту та вибором певної торгової марки добрива за оптимальною ціною. Підхід реалізовано у вигляді модуля в системі підтримки прийняття рішень у землеробстві.

***Ключові слова:** добрива, автоматизація підбору, балансовий метод, винос поживних речовин рослинами, оптимальна ціна*

Стан проблеми та постановка задачі. У сучасних умовах широкого застосування комп'ютерно-орієнтованих систем в аграрному виробництві авторами реалізовано автоматизований підбір добрив за балансовим методом у рамках інформаційно-аналітичної системи підтримки прийняття рішень у землеробстві, що розробляється в Інституті водних проблем і меліорації НААН.

Для оптимізації процесу підбору добрив при вирощуванні різних сільськогосподарських культур та виконанні технологічних операцій з внесення добрив за допомогою системи отримуються варіанти рішень щодо їх кількості та оптимального набору. Система обирає добрива з присутніх на ринку торговельних марок таким чином, щоб забезпечити внесення необхідної кількості діючих речовин (N, P, K) і оптимізацію їх за ціною. Оптимальним приймається набір добрив, що з заданою точністю забезпечує потребу NPK і є мінімальним за ціною. Рішення можливо отримати як для поточного внесення, так і розрахувати потребу в добривах на весь період вегетації.

На початковому етапі для підбору добрив проводиться вибір ділянки чи поля та аналізуються його агрохімічні властивості. Цей процес може здійснюватися в он-лайн режимі шляхом отримання інформації з присутніх у системі ГІС-шарів – карти ґрунтів України щодо типу ґрунту та осереднених агрохімічних показників за даними ґрунтових обстежень.

Внесення поживних речовин із ґрунту рослинами визначається відповідно до їх типу, прогнозованої урожайності основної та побічної продукції, попередників, а також наявності внесених органічних добрив.

У задачах підбору мінімального по ціні набору добрив, що з достатньою точністю дозволяє внести в ґрунт необхідну кількість поживних речовин (азоту, фосфору та калію), переважає математичне формулювання у вигляді задачі лінійного програмування, що розв'язується симплекс-методом [1,2]. Недоліком такого підходу є поліноміальна обчислювальна складність симплекс-методу, що призводить до складнощів при розв'язанні з використанням бази даних добрив великого розміру. Зокрема, у [1,2] розглядається підбір лише з десятків найменувань.

Альтернативою є використання ітераційних, зокрема градієнтних [3], або евристичних (нейронні мережі, генетичні алгоритми) методів [4, 5]. Такі алгоритми дозволяють контролювати точність і час, що витрачається на розв'язання оптимізаційної задачі. Вони можуть бути застосовані не тільки до задач лінійного програмування, але й до випуклих. Евристичні методи мають перевагу у випадку багатокритеріальної оптимізації, коли існує можливість збіжності градієнтних методів до локальних оптимумів.

Метод дослідження. Наразі в господарствах норми внесення добрив для одержання запланованого врожаю визначаються шля-

хом використання одного із варіантів балансового методу. При цьому потребу в добривах обчислюють окремо для кожного їх виду (азотні, фосфорні, калійні), а норму внесення поживних речовин (N, P₂O₅, K₂O) визначають за виносом їх з урожаєм. При цьому враховуються наявність відповідних речовин у ґрунті та коефіцієнти використання поживних речовин з мінеральних добрив і ґрунту.

Таким чином, будемо розглядати формулу для обчислення норми внесення поживних речовин [6,7]:

$$H = \frac{Y \cdot B - M \cdot K}{K_d}, \quad (1)$$

де H – норма внесення з добривами конкретної поживної речовини, кг/га; Y – планова врожайність культури, ц/га; B – винос поживної речовини з ґрунту урожаєм основної та побічної продукції, кг/ц основної продукції; M – вміст доступних форм даної поживної речовини в ґрунті, кг/га; K , K_d – коефіцієнти використання поживної речовини відповідно з ґрунту і добрив, %.

У разі внесення разом із мінеральними органічних добрив формулу доповнюють виразом, що враховує використання рослинами доступних форм даної поживної речовини з органічних добрив [6,7]:

$$H = \frac{Y \cdot B - M \cdot K - D_o \cdot P_o \cdot K_o}{K_d}, \quad (2)$$

де D_o – норма внесення органічних добрив, т/га; P_o – вміст поживної речовини в органічному добриві, кг/т; K_o – коефіцієнт використання даної поживної речовини з органічного добрива, %.

Дані щодо використання рослинами поживних речовин із ґрунту, органічних і мінеральних добрив, а також щодо виносу азоту, фосфору і калію з урожаєм наведені у довідковій літературі, зокрема [7]. При цьому використання поживних речовин із ґрунту залежить від його типу і забезпеченості поживними речовинами, а використання поживних речовин рослинами з органічних і мінеральних добрив триває 2–3 роки.

Нехай інформація стосовно наявних добрив зберігається в базі даних у формі $(M_i, S_{1i}, S_{2i}, S_{3i}, C_i)$, $i = 1, \dots, N$, де M_i – назва добрива; S_{1i}, S_{2i}, S_{3i} – концентрації азоту,

фосфору та калію, відповідно; C_i – ціна. Позначивши цільові значення кількості речовин, отримані за формулами (1-2) як S_{1g}, S_{2g}, S_{3g} , формалізуємо задачу оптимізації таким чином:

$$\text{мінімізувати по } x \quad f(x) = \sum_{i=1}^N (C_i x_i)$$

за умов

$$g(x) = \sum_{j=1}^3 (\bar{S}_j(x) - S_{jg})^2 < \varepsilon_1 \sum_{j=1}^3 S_{jg}, \quad \bar{S}_j(x) = \sum_{i=1}^N (S_{ji} x_i), \quad (3)$$

$$x_i \geq \varepsilon_2, \quad i = 1, \dots, N,$$

де $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – задані константи, що визначають точність розрахунків.

Дана задача є задачею випуклої оптимізації, відмінність якої від задачі лінійного програмування полягає у середньоквадратичному критерії оцінки відхилення вибраних концентрацій речовин від цільових.

Задачу (3) пропонуємо чисельно розв'язувати градієнтним методом. При цьому на кожному кроці градієнтної процедури проводиться проектування наблизеного розв'язку на множину умов. Випукла постановка задачі дозволяє використовувати для цього апарат псевдообернення, отримуючи середньоквадратичні оцінки точності на всіх етапах процедури.

Алгоритм оптимального підбору добрив за діючою речовиною можна записати так:

1. Вибираємо крок H , що залежить від максимальної ціни добрив.
2. Виконуємо крок градієнтної процедури (i – номер ітерації):

$$\tilde{x}^{(i+1)} = x^{(i)} - H \cdot \text{grad}f(x) \Big|_{x=x^{(i)}}. \quad (4)$$

Для пришвидшення збіжності пропонується зміщувати поточне наближення не у напрямку найшвидшого спуску, а у напрямку, що залежить від попередніх наближень:

$$\tilde{x}^{(i+1)} = 2x^{(i)} - x^{(i-1)} - H \cdot \text{grad}f(x) \Big|_{x=x^{(i)}}. \quad (5)$$

Формула (5) застосовується у разі якщо таке зміщення призведе до зменшення значення цільової функції:

$$(x^{(i-1)} - x^{(i)} + H \cdot \text{grad}f(x) \Big|_{x=x^{(i)}}) \cdot C > 0, \quad \text{де}$$

(\bullet, \bullet) – операція скалярного добутку векторів. В іншому разі застосовується формула (4).

3. Проектуємо $\tilde{x}^{(i+1)}$ на множину $x: x_i \geq \varepsilon_2, i = 1, \dots, N$:

$$\bar{x}^{(i+1)} = \begin{cases} \tilde{x}_k^{(i+1)}, & \tilde{x}_k^{(i+1)} > \varepsilon_2 \\ 0, & \tilde{x}_k^{(i+1)} \leq \varepsilon_2 \end{cases}$$

4. Проектуємо $\bar{x}^{(i+1)}$ на множину $x: g(x) = 0$ використовуючи апарат псевдообернених матриць:
- $$x^{(i+1)} = A^+ \cdot (S_{1g}, S_{2g}, S_{3g}) + (I - A^+ A) \bar{x}^{(i+1)},$$

де $A = \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix}$, а \bullet^+ - операція

псевдообернення.

5. Якщо $\|\bar{x}^{(i+1)} - x^{(i+1)}\|^2 > \varepsilon_3$, де ε_3 - задана константа, встановлюємо $\tilde{x}^{(i+1)} = x^{(i+1)}$ та повертаємось до пункту 3. Таким чином ітераційно знаходимо середньоквадратично найближчу до $\tilde{x}^{(i+1)}$ кількість добрив, що середньоквадратично задовольняє обмеженням задачі (3).

6. Якщо $\|x^{(i+1)} - x^{(i)}\|^2 > \varepsilon_3$, а проведена кількість ітерацій не більша за задану максимальну, переходимо до пункту 2 алгоритму.

7. Проектуємо $x^{(i+1)}$ на множину $x: x_i \geq \varepsilon_2, i = 1, \dots, N$:

$$\hat{x} = \begin{cases} x_k^{(i+1)}, & x_k^{(i+1)} > \varepsilon_2 \\ 0, & x_k^{(i+1)} \leq \varepsilon_2 \end{cases}$$

8. Перевіряємо виконання умови

$$g(\hat{x}) < \varepsilon_1 \sum_{j=1}^3 S_{jg}. \quad \text{Якщо вона}$$

виконується, то \hat{x} - точний розв'язок задачі, інакше — наближений.

Реалізація алгоритму у вигляді модуля розрахунку доз добрив. Описаний вище алгоритм був програмно реалізований у вигляді веб-додатку на мовах HTML5 та JavaScript у вигляді модуля системи підтримки прийняття рішень у землеробстві.

Користувач за допомогою інтерактивної карти задає для визначеного поля культуру, що там зростає, та величини (рис. 1), потрібні для оцінки кількості поживних речовин, які

мають бути внесені. Після цього система завантажує на комп'ютер користувача список добрив, які можуть вноситись, та виконує підбір оптимального їх набору.

Грунтові характеристики (тип ґрунту та осереднені агрохімічні показники) приймаються за даними ґрунтових обстежень. У разі наявності фактичних даних аналізу ґрунтових профілів інформація вноситься безпосередньо в діалогове вікно.

Потреба поля в добривах визначається як сума добутку доз добрив на відповідну площу ділянок з однаковими характеристиками. Підбір добрив і доз здійснюється автоматично. Для цього використовуються актуальні бази даних присутніх на ринку добрив за оптимальною ціною та необхідною кількістю діючої речовини.

Система, що розробляється, є веб-орієнтованою, клієнт-серверною. Варіанти рішень та база даних добрив зберігаються на сервері. Розрахунки і розв'язання оптимізаційної задачі (3) проводяться на комп'ютері користувача.

Оскільки наразі потужність користувацьких пристроїв є достатньо високою й надалі зростає, актуальним є використаний підхід, пов'язаний з перенесенням обчислювально складних операцій з серверу на користувацький комп'ютер. Важливим тут є балансування завантаженості процесорів серверу та каналів зв'язку. Розглядувана задача з однієї сторони потребує виконання обчислень, значних при великому завантаженні сервера, але таких, що за задовільний час можуть бути виконані на комп'ютері користувача, а з іншої сторони може потребувати передачі великого об'єму даних (вибірки з бази даних добрив). Реалізоване архітектурне рішення є оптимальним у ситуації великої кількості користувачів системи та невеликої бази даних добрив. В інших ситуаціях доречним є мати як клієнтську, там і серверну реалізацію алгоритму, з автоматичним вибором однієї з них в залежності від поточного стану серверу та системи.

Важливим аспектом, необхідним для впровадження та ефективного використання розробленого модуля, є формування та поповнення баз даних агрохімічних параметрів моделей (1), (2) та бази даних наявних на ринку добрив.

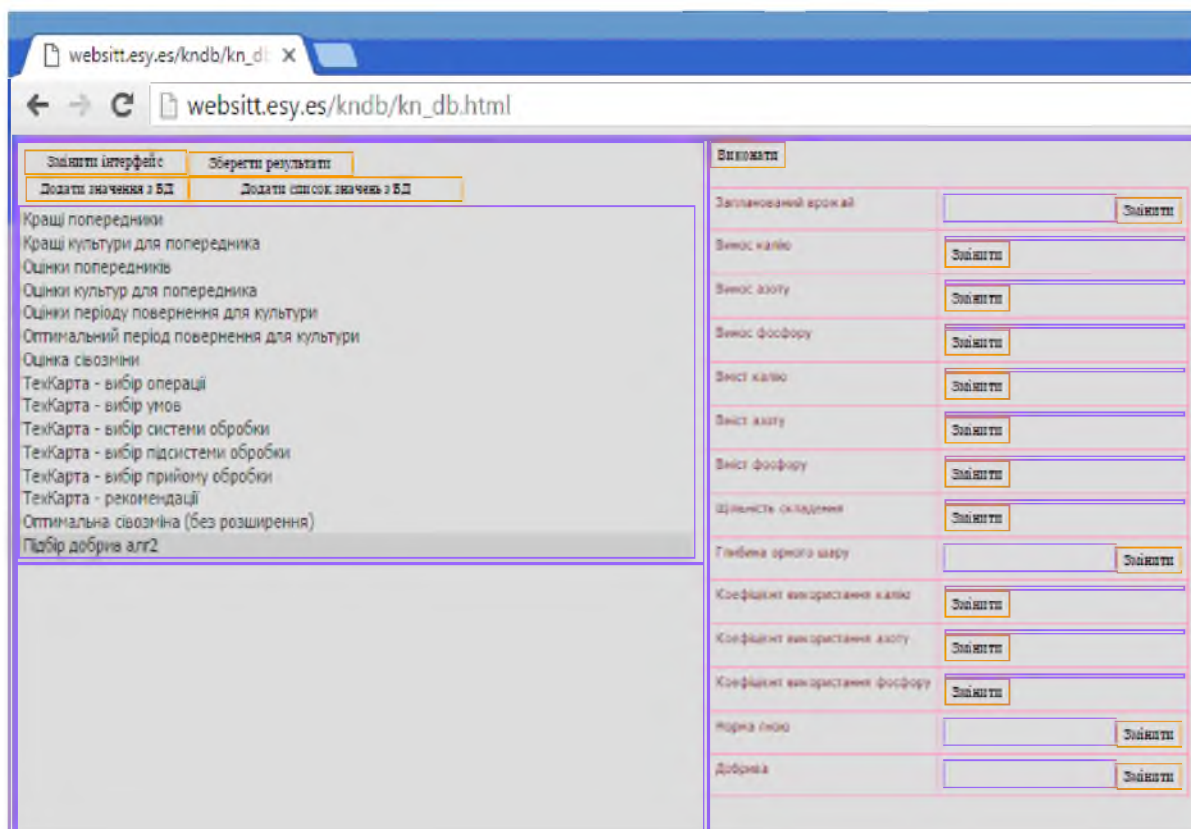


Рис. 1 Веб-інтерфейс модуля розрахунку доз добрив

В Інституті водних проблем і меліорації ведуться роботи щодо формування розділів «Агрохімічні властивості ґрунтів України за даними ІХ туру обстеження у розрізі областей» та «Винесення поживних речовин сільськогосподарськими культурами з ґрунту» відповідних баз даних та вивчаються потенційні можливості автоматичного формування та оновлення бази даних мінеральних добрив.

Висновки. Алгоритм оптимального підбору доз добрив, запропонований і реалізований авторами у вигляді модуля для веб-системи підтримки прийняття рішень дозволить аграрним підприємствам зекономити

час на розрахунки та кошти на купівлю добрив. Зауважимо, що ефективність застосування розробленого математичного та програмного забезпечення залежить від повноти та детальності вмісту баз даних, які використовуються у його роботі.

Модуль можна використовувати при плануванні врожаю на сезон або розрахунку кількості чергового внесення добрив, визначення прогнозованої врожайності при відновленні систем зрошення на великих територіях, а також он-лайн консультаціях всіх зацікавлених сторін.

Бібліографія

1. Zaliwski A. S. 2012. Validation of the decision support system ZeaSoft – fertilization module. *Inzynieria Rolnicza*. 2(137): 357-365.
2. M.V. Bueno-Delgado, J.M. Molina-Martinez, R. Correoso-Campillo, P. Pavón-Mariño. 2016. An Android application for the optimization of fertilizer cost in fertigation // *Computers and Electronics in Agriculture*. 121: 32-42.
3. Michael J Hartley. 1983. Econometric methods for agricultural supply under uncertainty: Fertilizer use and crop response. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*. 94: 575-601.
4. D. Pokrajac, Z. 2001. Obradovic Neural network-based software for fertilizer optimization in precision farming. *International Joint Conference*. 3: 2110 – 2115.

5. Ralf Seppelt, Alexey Voinov. 2002. Optimization methodology for land use patterns using spatially explicit landscape models. *Ecological Modelling*. 151: 125-142.
6. Лазер П.Н., Міхеев Є.К. Інструментарій і технології організації інформації в землеробстві. Навчальний посібник/Для студентів агрономічних спеціальностей. – Херсон: Видавництво ХДУ. – 2006. – 368 с.
7. Органічна система землеробства в лісостепу України. – К.:НУБІП, 2014. – 39 с.

М.И. Ромащенко, Т.В. Матяш, В.О. Богаенко, В.П. Ковальчук, Н.В. Сорока
Автоматизация и оптимизация подбора удобрений по балансовому методу

В статтє предложєн подход к автоматизации процесса подбора удобрений по компонентам балансовым методом. Удобрения подбираются по выносу питательных веществ растениями из почвы с выбором определенной торговой марки по оптимальной цене. Подход реализован в виде модуля в системе поддержки принятия решений в земледелии.

M.I. Romashchenko, T.V. Matiash, V.O. Bohaienko, V.P. Kovalchuk, N.V. Soroka
Automation and optimization of fertilizer selection using the balance method

An approach to automating the selection of the cheapest set of fertilizers which application supplies needed amount of nutrients calculated using balance method according to nutrients removal from the soil done by the plants has been proposed. The approach has been implemented as a module of decision-support system in crop farming, which can advise farmers online