

Волоха М. П.

УДК 633.63:631.35

АГЕНТНЕ ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАНІЗОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИРОЩУВАННЯ БУРЯКІВ ЦУКРОВИХ

М. П. ВОЛОХА, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН України

E-mail: volmp@i.ua

Анотація. Метою моделювання технологічних процесів виробництва буряків цукрових є підвищення їх продуктивності за рахунок визначення та обґрунтування оптимальних параметрів.

Дослідження технологічних процесів і технічних засобів на основі імітаційного, зокрема агентного моделювання, як одного із його видів, дозволяє дослідити взаємозв'язки, виділити техніко-економічні показники, оцінити вплив на прибутковість, визначити напрямки розвитку та шляхи вдосконалення техніко-технологічної бази галузі буряківництва.

Проведено аналіз можливості комплексного дослідження технології виробництва буряків цукрових шляхом розробки та застосування імітаційних моделей. Дослідження параметрів технологічних процесів виробництва буряків цукрових пропонується проводити за методом агентного

імітаційного моделювання, що дозволяє моделювати технологічний процес на різних рівнях агрегації показників на основі єдиного методологічного підходу. Статистики моделювання у вигляді множини значень параметрів і їх подальше оброблення статистичними методами дозволяють провести аналіз зв'язків між величинами параметрів. У кінцевому підсумку результати моделювання використовуються для прийняття рішення про вибір оптимального варіанта з множини допустимих з урахуванням інтегрального критерію, який виражає ефективність технологічного процесу.

Ключові слова: буряки цукрові (БЦ), технологічний процес (ТП), технічний засіб (ТЗ), передпосівний обробіток ґрунту (ПОГ), сівба, польова схожість насіння, імітаційне моделювання, агент, алгоритм, симплекс, візуалізація.

Актуальність. Впродовж років незалежності України посіви БЦ катастрофічно зменшувались (у 2015 році вони зібрані на площі лише 238 тис. га), внаслідок чого були втрачені зовнішні ринки збуту. Разом з тим, виробництво цукру в Україні і донині є одним з провідних стратегічних

напрямів розвитку економіки країни і необхідною умовою незалежності від імпортерів та коливань цін на світовому ринку. Тому цукрова промисловість потребує власної сировини і підвищення врожайності БЦ за умов такого значного скорочення площ їх

Волоха М. П.

посівів є надважливим завданням буряківників.

Серед інших просапних польових культур БЦ є найвимогливішими як до ґрунтово-кліматичних умов, так і до робочих органів (РО) машин, виконуючих складні ТП при їх вирощуванні. Продуктивність виробництва цукробурякової сировини визначається рівнем застосовуваних механізованих технологій і досконалістю ТЗ на всіх етапах від ПОГ і сівби насіння весною до збирання коренеплодів восени. Дослідження таких складних багатопараметричних систем пов'язане з проблемою вибору найбільш інформативних ознак, розробки системних показників та обчислювального алгоритму з урахуванням ймовірнісної природи умов функціонування РО машин, що наразі є мало вивченим в порівнянні з іншими відомими методами моделювання та прийняття рішень і перебуває в зародковому стані.

Наведене вказує на актуальність і значимість досліджень, спрямованих на підвищення продуктивності виробництва БЦ за рахунок розв'язування постановлених задач на основі комплексного підходу до багатокритеріального оцінювання ТП і ТЗ шляхом їх математичного моделювання [1, с. 134-135; 2; 3, с. 249].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Відомо, що традиційні підходи комп'ютерної імітації (системна динаміка, дискретно-подієве моделювання) не призначені для дослідження складних децентралізованих систем, у той час, як

мультиагентні моделі досить успішно з ними справляються. Насамперед, враховується поведінка окремо взятих "особин", тобто агентів системи, в результаті чого стає можливим виявляти досить тонкі особливості колективної поведінки агентів, як елементів системи, враховувати взаємодії їх один з одним і з навколишнім середовищем [4, с. 208-211; 5, с. 3693-3709].

Мета досліджень. Метою дослідження є підвищення продуктивності буряків цукрових шляхом агентного імітаційного моделювання механізованих технологічних процесів їх вирощування.

Результати дослідження та їх обговорення. До основних проблем постановки задачі управління ТП ПОГ та сівби БЦ, як складних багатопараметричних систем, відносяться: 1) неузгодженість одиниць виміру; 2) неформалізований, якісний характер локальних критеріїв; 3) необхідність формалізації правил порівнянь рішень щодо отримання найкращого; 4) складність методів пошуку компромісного рішення [1, с. 137-138; 6, с. 207-208].

ТП ПОГ та сівби можна представити в дискретно-статичному вигляді. З метою зменшення складності задачі, а також вирішення проблеми подолання багатокритеріальності, в даній статті запропонований підхід, при якому в результаті виконання послідовності технологічних операцій за умов певних фіксованих параметрів можна отримати кінцевий продукт з відповідним набором властивостей,

Волоха М. П.

тобто кінцевий результат можна розглядати як точку в просторі критеріїв якості ТП. Тоді $x = (x_1, \dots, x_n)$ – це така «точка», якій відповідає вектор значень локальних критеріїв $f(x) = (f_1(x), \dots, f_g(x))$, які описують властивості отриманого продукту, тобто результату ТП.

Проведені дослідження механізованих технологічних процесів вирощування БЦ довели наявність зв'язку між параметрами $x = (x_1, \dots, x_n)$ та значеннями локальних критеріїв $f(x) = f_1(x), \dots, f_q(x)$. Саме тому задачу підвищення ефективності ТП вирощування БЦ можна розглядати як задачу пошуку у просторі критеріїв якості. Порівняльний аналіз відомих алгоритмів пошукової оптимізації показав переваги методу конфігурацій (множини вершин, що складається з k точок, число яких більше розмірності n простору незалежних змінних і які лежать одночасно у підпросторі розмірністю, меншою за n), що деформуються [7, с. 239-141, 8, с. 4.25-4.26].

За умови застосування таких методів для розв'язку задачі безумовної мінімізації скалярної функції в якості основної конфігурації використовуються правильні симплекси. Управління процесом пошуку при цьому здійснюється за рахунок вибору локально оптимального напрямку зсуву центру симплекса і вибору величини кроку, що забезпечує зменшення значення функції, яка оптимізується в центрі симплекса. Величина кроку змінюється шляхом зміни розміру симплексу зі збереженням правильної форми симплекса. Для пошуку

максимального значення функції на кожному наступному повторенні використовується певна конфігурація $f_i(x)$ [9, с. 7.75-7.77].

Пропонований алгоритм складається з таких кроків [9, с. 7.78-7.80]:

1. Побудувати правильний симплекс S_1 з центром x^1 і радіусом описаної гіперсфери R_1 .

2. Приймаємо $N=1$.

3. Виміряти значення функції $f(x)$ у вершинах симплекса S_N .

4. Визначити $f^*(x)$ за формулою:

$$f^*(x^N) = \frac{1}{n+1} \sum_{i=1}^{m+1} f(x^{N,i}).$$

5. Пронумерувати вершини симплекса S_N в порядку зменшення значень функції $f(x)$ в цих вершинах.

6. Обчислити значення критерію I_i^N

7. Визначити $I_i^N(m^N, l^N) = \max I_i^N$

8. Відобразити $m^N + l^N$ вершин, побудувати симплекс S_{N+1} за формулами:

$$x^{N+1} = x^N + \frac{2m^N}{n+1-l^N} \Delta_N(m^N, l^N);$$

$$x^{N+1,j} = x^{N,j} + 2\Delta_N(m^N, l^N), \quad j=1, \dots, m^N;$$

$$x^{N+1,j} = x^{N,j} + \frac{2m^N}{n+1-l^N} \Delta_N(m^N, l^N), \quad j=m^N+1, \dots, m^N+l^N;$$

$$x^{N+1,j} = x^{N,j}, \quad j=m^N+l^N, \dots, n+1.$$

9. У нових вершинах симплекса S_{N+1} виміряти значення функції $f(x)$

10. Переходимо до наступного кроку, коли $N=N+1$.

11. Визначити $f^*(x)$ за формулою:

$$f^*(x^N) = \frac{1}{n+1} \sum_{i=1}^{m+1} f(x^{N,i}).$$

12. Перевірити виконання рівності $f^*(x^N) - f^*(x^{N+1}) \geq \varepsilon \|x^N - x^{N+1}\|^2$

При її виконанні перейти до п.5. а в разі невиконання – пошук припинити.

Волоха М. П.

Запам'ятати вершину з мінімальним значенням функції.

На відміну від відомих емпіричних моделей, які відносяться до класу «чорної скрині», дослідження впливу множини внутрішніх параметрів складної системи на результати її функціонування можливе завдяки особливому виду імітаційного моделювання – агентному. Поняття агент являє собою активний інформаційний об'єкт, яким може позначатись суб'єкт господарської діяльності, технологічний пристрій, організація, населений пункт і т.д. Залежно від того, який об'єкт являє собою агент, модель може відповідати високому рівню абстракції, середньому, низькому або поєднувати кілька рівнів, що обумовлює універсальність цієї парадигми моделювання.

Агент – модель взаємного впливу досліджуваного об'єкта та середовища як послідовності дій та реакції. Для представлення можливих дій агента та його взаємодії із зовнішнім середовищем необхідно мати інструмент, який дозволяє у формальному вигляді описувати поведінку агента. Формальна архітектура агента задається через опис середовища, в якому функціонує агент, сприйняття агентом цього середовища та його діями.

Отже, визначивши правила взаємодії агентів із зовнішнім середовищем, надаємо детальну модель ТП. Агенти у цьому випадку моделюємо як окремі РО машин, що впливають на середовище з метою забезпечення агротехнічних вимог до виконання ТП. Середовищем, в якому взаємодіють агенти, є ґрунтово-

кліматичні та агротехнічні умови, розмірно-масові характеристики насіння. Параметри середовища, які мають вплив на результати діяльності агентів, моделюємо на основі статистичних моделей з урахуванням випадковості домінуючих факторів. В результаті імітаційного експерименту з агентною моделлю отримуємо характеристики, що є важливими для двоєдиного ТП ПОГ та сівби. Отримані значення є вихідною інформацією для одного циклу оптимізації, заснованої на алгоритмі методу конфігурацій, що деформуються.

Для реалізації запропонованого підходу розроблено дворівневу модель ТП ПОГ та сівби БЦ. На першому етапі визначаємо критерії оцінки ефективності даного ТП за:

f_1 – польовою схожістю насіння, %;

f_2 – середньою глибиною обробітку $4,0 \pm \sigma$;

f_3 – кількістю грудочок ґрунту діаметром до 25 мм.

На значення виділених критеріїв впливають керовані та некеровані фактори.

Як доведено нашими дослідженнями, найбільш важливими показниками ТП

висіву насіння БЦ, що утворюють компоненти вектора x , є:

x_1 – маса насінини; x_2 – початкова швидкість насінини;

x_3 – кут нахилу до горизонту; x_4 – робоча швидкість сівалки .

Розроблена модель об'єднує три типи агентів: «агрегат», «ґрунт» та «насінина». Зовнішнє середовище

Волоха М. П.

моделюється як сукупність некерованих ґрунтово-кліматичних факторів, що впливають на досліджувані параметри. Агрегат реалізується як послідовно взаємодіюча низка енергетичних засобів, машин та РО, кожний з яких в свою чергу реалізується окремим агентом. Відповідна функція агента $g: S \times I \times A \rightarrow A'$. Зовнішнє середовище визначається множиною станів $S = \{S_i\}$, а ґрунт описується функцією оновлення параметрів $h: S \times A' \times K \rightarrow K$. Насінина

моделюється як стохастична величина, яка за заданими параметрами функції розподілу ймовірності реалізує предикат схожості $G(I \rightarrow A)$.

Імітаційний експеримент проводився з використанням шести ґрунтообробних агрегатів (табл.). За умови коливань глибини обробітку від мінімальної 3,3 до максимальної - 3,7 см, польова схожість насіння (сорт Гала, гібрид Шевченківський) варіювалась в межах від 57 до 72 %.

Початкові параметри імітаційної моделі

Номер і склад агрегата	Параметри агрегата					Параметри ґрунту і насіння			
	Робоча швидкість	Ширина захвата	Маса	Потужн. двигуна	Витрати пального	Глибина обробітку	Вміст грудочок $\varnothing < 25\text{мм}$	Польова схожість	
	км/год	М	кг	кВт	кг/га	См	%	%	
1	ХТЗ-121+ АРВ-8,1-02	11,6	8,6	10200	88	2,4	4,0±0,9	98,5	66,7
2	МТЗ-80+ УСМК-5,4Б	8	5,4	4150	55	3,5	4,0±1,1	96,2	57,9
3	ХТЗ-121+ АРВ-8,1-01	11	9	10150	88	2,6	4,0±1,0	90,7	62,8
4	Т-150К+ АРВ-8,1-02	8	8,6	9700	121	4,7	4,0±0,8	91,1	60,4
5	Т-150К+ Компактор	7,5	6	11520	121	4,9	4,0±0,8	96,8	62,8
6	ХТЗ-121+ АРВ-8,1-01+...02	7,5	9	12050	88	3,2	4,0±0,7	87,5	62,0

Статистичні дані результатів моделювання за критерієм f_2 , як найбільш значущого серед тих, що чинять суттєвий вплив на польову схожість насіння, представлені графічно на рис. 1.

Волоха М. П.

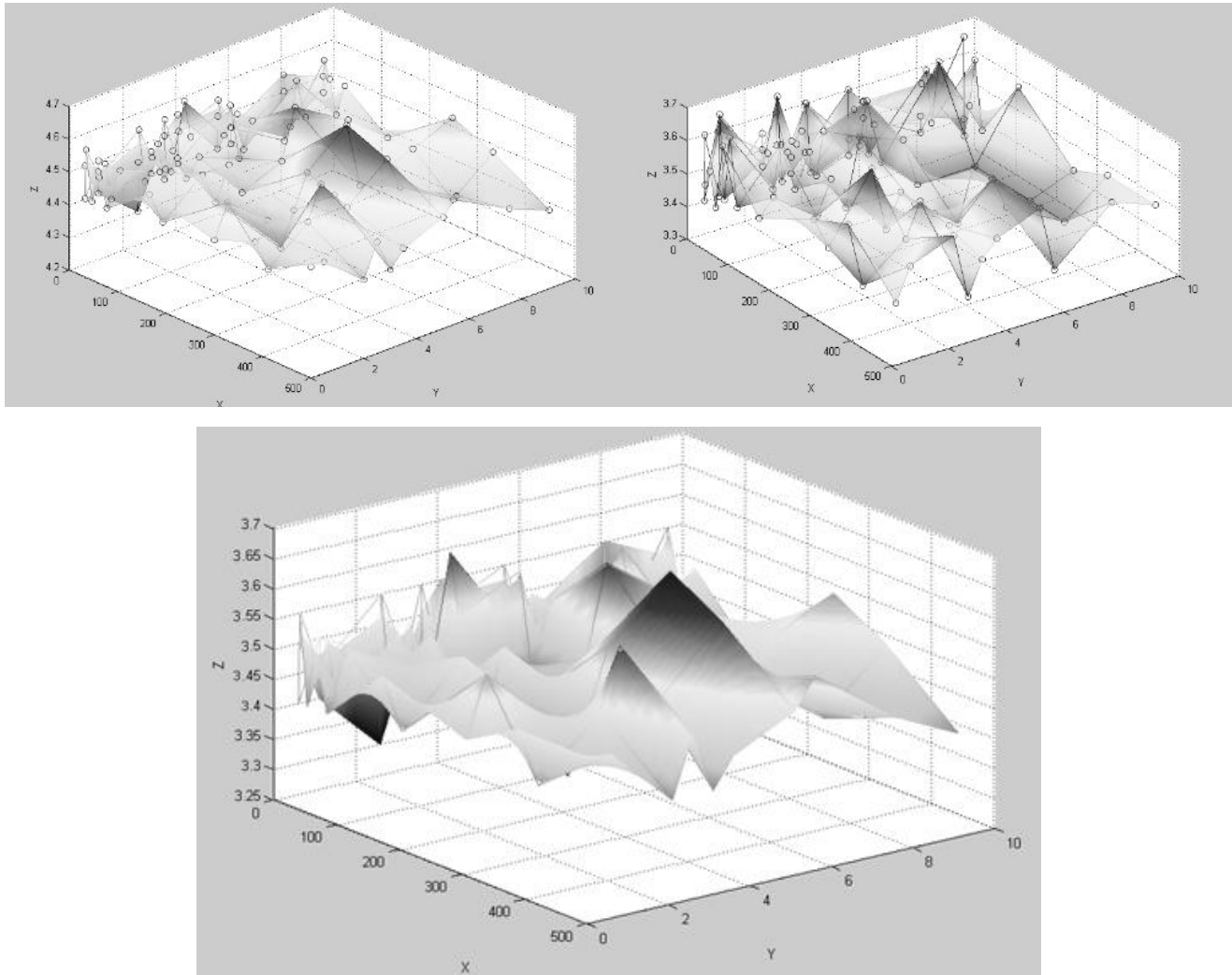


Рис. 1. Результати моделювання на нижньому рівні за умов нормальної вологості ґрунту (зліва), за робочої швидкості агрегатів 10,5-11,5 м/с (справа) (вісь Z – глибина обробітку, см; осі X та Y – розміри контрольної ділянки, м)

Для візуального порівняння одержаних значень критеріїв та вибору підходу щодо агрегації отриманих оцінок проведена їх нормалізація за шкалою відношень (рис. 2). Порівняння варіантів за інтегральним критерієм

(безрозмірна величина в діапазоні від 0 до 1 - згортка вимірних в різних одиницях показників) доводить переваги агрегата ХТЗ-121+АРВ-8,1-02 – 0,9 відносних одиниць.

Значення критеріїв

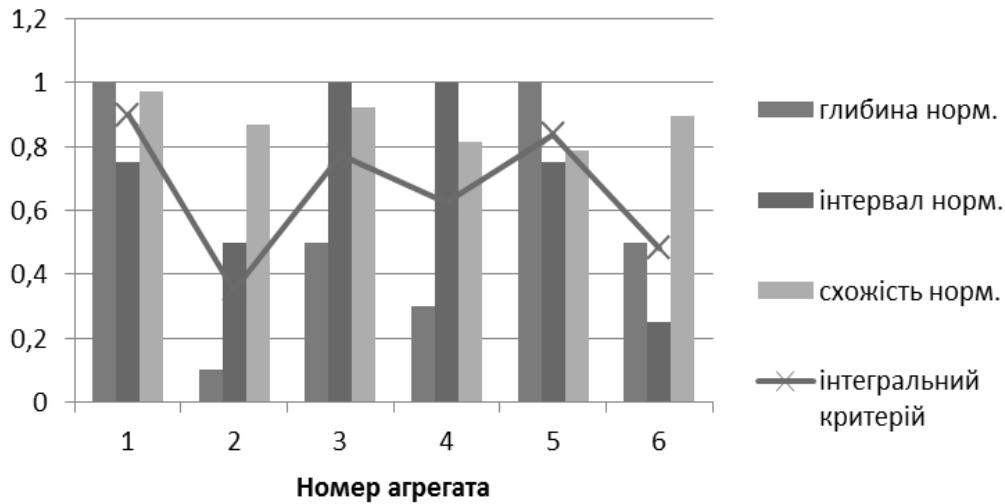


Рис. 2. Нормалізовані критерії двоєдиного ТП ПОГ та сівби

Висновки. Створений алгоритм розв'язання оптимізаційної багатокритеріальної задачі забезпечення максимальної польової схожості насіння, оснований на методі конфігурацій, що деформуються, реалізується через обчислення значень параметрів ТП, які залежать від некерованих факторів зовнішнього середовища (вологість, твердість ґрунту, масові характеристики насіння), де взаємодіють агенти імітаційної моделі «ґрунт», «насінина» та «агрегат» з основними початковими параметрами (відхилення від середньої глибини обробітку ґрунту, вміст грудочок $\varnothing < 25\text{мм}$, лабораторна схожість насіння, робоча швидкість агрегатів, ширина захвата, маса,

потужність двигуна, витрати пального), які є вихідною інформацією для одного циклу оптимізації.

Імітаційними експериментальними дослідженнями встановлені межі варіювання польової схожості насіння від 58 до 72% за умов зміни глибини передпосівного обробітку ґрунту, як головного чинника одержання сходів, від мінімальної 3,3 см до максимальної 3,7 см. Порівнянням одержаних значень показників імітаційного моделювання, нормалізованих за шкалою відношень, доведено переваги агрегата ХТЗ-121+АРВ-8,1-02 – 0,9 відносних одиниць за інтегральним критерієм – згорткою виміряних в різних одиницях показників.

Список використаних джерел

1. Boldyrieva L., Volokha M. Simulation technology of sugar beet.

Вісник Національного авіаційного університету. 2014. Т. 61. № 4. С 133-139.

Волоха М. П.

2. Волоха М. П. Принципи моделювання технологічних процесів виробництва цукрових буряків. *Проблеми екологічної біотехнології* [Електронний науковий журнал НАУ]. 2013. № 2. Режим доступу: <http://ecobio.nau.edu.ua/index.php/ecobiotech/article/view/5503/6215>

3. Волоха М. П. Моделювання технологічних процесів підготовки ґрунту і насіння до сівби цукрових буряків. *«Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин»:* загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник КНТУ. Кіровоград, 2013. Вип. 43. Ч. I. С. 246–252.

4. Карпов Ю. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 400 с.

5. Lima, R. M., Sousa, R. M. and Martins, P. J. Distributed production planning and control agent-based system. *International Journal of Production Research*, 44(18 - 19): 3693 - 3709.

6. Волоха М. П. Імітаційне моделювання технологічних процесів виробництва буряків цукрових. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК*. 2016. Вип. 251. С. 204–214.

7. Волоха М. П. Подолання багатокритеріальності при моделюванні технологічних процесів вирощування цукрових буряків. *«Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України»:* збірник наукових праць

УкрНДІПВТ ім Л. Погорілого. Дослідницьке, 2014. Вип. 18 (32). кн.2. С. 237–243.

8. Дорошенко Ю. О., Волоха М. П. Моделювання двоєдиного технологічного процесу передпосівного обробітку ґрунту і сівби буряків цукрових. *Матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції «ABIA–2015»*. Київ, 2015. 28–29 квітня. С. 4.22–4.27.

9. Волоха М. П. Адаптована агентна імітаційна модель технологічних процесів і технічних засобів вирощування буряків цукрових. *Матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції «ABIA–2017»*. Київ, 2017. 19–21 квітня. С. 7.70–7.81.

References

1. Boldyrieva L., Volokha M. (2014). *Modelyuvannya tekhnolohiyi vyrobnytstva tsukrovoho buryaku* [Simulation technology of sugar beet]. *Visnyk Natsional'noho aviatorsynoho universytetu*. T. 61, 4, 133-139.

2. Volokha M. P. *Pryntsypy modelyuvannya tekhnolohichnykh protsesiv vyrobnytstva tsukrovykh buryakiv*. [Principles of modeling of technological processes of sugar beet production]. *Problemy ekolohichnoyi biotekhnolohiyi* [Elektronnyy naukovyy zhurnal NAU]. 2013, 2. Rezhym dostupu: <http://ecobio.nau.edu.ua/index.php/ecobiotech/article/view/5503/6215>

3. Volokha M. P. (2013) *Modelyuvannya tekhnolohichnykh protsesiv pidhotovky ґрунту i nasinnya do sivby tsukrovykh buryakiv* [Modeling of technological processes of preparation of soil and seeds for the sowing of sugar beet] *«Konstruyuvannya, vyrobnytstvo ta*

Волоха М. П.

ekspluatatsiya sil's'kohospodars'kykh mashyn»: zahal'noderzhavnyy mizhvidomchyy naukovo-tekhnichnyy zbirnyk KNTU. Kirovohrad, Vyp. 43. CH. I. 246–252.

4. Karpov Yu. (2005). Imitatsionnoye modelirovaniye sistem. Vvedeniye v modelirovaniye s AnyLogic 5 [Simulation of systems. Introduction to modeling with AnyLogic 5]. SPb: BKHV-Peterburg, 2005. 400.

5. Lima, R. M., Souza, R. M. i Martins, P. Ya. Rozpodilena systema keruvannya aerokosmichnym planuvannyam i kontrolem.[Distributed production planning and control agent-based system]. Mizhnarodnyy zhurnal vyrobnychykh doslidzhen', 44 (18-19): 3693 - 3709.

6. Volokha M. P. (2016). Imitatsiynе modelyuvannya tekhnolohichnykh protsesiv vyrobnytstva buryakiv tsukrovykh. [Imitation modeling of technological processes of sugar beet production] Naukovyy visnyk Natsional'noho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannya Ukrainy. Seriya: Tekhnika ta enerhetyka APK.. Vyp. 251. 204–214.

7. Volokha M. P. (2014) Podolannya bahatokryterial'nosti pry modelyuvanni

tekhnolohichnykh protsesiv vyroshchuvannya tsukrovykh buryakiv. [Overcoming multicriteria in modeling of technological processes of growing sugar beet]. «Tekhniko-tekhnologichni aspekty rozvytku ta vyprobuvannya novoyi tekhniky i tekhnolohiy dlya sil's'koho hospodarstva Ukrainy»: zbirnyk naukovykh prats' UkrNDIPVT im L. Pohoriloho. Doslidnyts'ke, Vyp. 18 (32). kn.2. 237–243.

8. Doroshenko Yu. O., Volokha M. P. (2015) Modelyuvannya dvoyedynoho tekhnolohichnoho protsesu peredposivnoho obrobitku hruntu i sivby buryakiv tsukrovykh [Modeling of two-way technological process of pre-sowing tillage of soil and seeding of beet sugar] Materialy XII Mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi «AVIA–2015».

9. Volokha M. P. (2017) Adaptovana ahentna imitatsiyna model' tekhnolohichnykh protsesiv i tekhnichnykh zasobiv vyroshchuvannya buryakiv tsukrovykh. [Adapted agent is an imitation model of technological processes and technical means of growing beet sugar] Materialy XIII Mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi «AVIA–2017».

**АГЕНТНОЕ ИМИТАЦИОННОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ
МЕХАНИЗИРОВАННЫХ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ ВЫРАЩИВАНИЯ
САХАРНОЙ СВЕКЛЫ**

Н. П. Волоха

Аннотация. Целью моделирования технологических процессов производства сахарной свеклы

является повышение их производительности за счет определения и обоснования оптимальных параметров. Исследование технологических процессов и технических средств на основе имитационного, в частности агентного моделирования, как одного из его видов, позволяет исследовать взаимосвязи, выделить технико-

Волоха М. П.

экономические показатели, оценить влияние на прибыльность, определить направления развития и пути совершенствования технико-технологической базы отрасли свекловодства.

Проведен анализ возможности комплексного исследования технологии производства сахарной свеклы путем разработки и применения имитационных моделей. Исследование параметров технологических процессов производства сахарной свеклы предлагается проводить по методу агентного имитационного моделирования, что позволяет моделировать технологический процесс на различных уровнях агрегации показателей на основе единого методологического подхода. Статистики моделирования в виде множества значений параметров и их последующая обработка статистическими методами позволяют провести анализ связей между величинами параметров. В конечном итоге результаты моделирования используются для принятия решения о выборе оптимального варианта из множества допустимых с учетом интегрального критерия, который выражает эффективность технологического процесса

Ключевые слова: *сахарная свекла, технологический процесс, техническое средство, предпосевная обработка почвы, сев, полевая всхожесть семян, имитационное моделирование, агент, алгоритм, симплекс, визуализация.*

IMITATION AGENTS FOR MODELING MECHANIZED TECHNOLOGICAL PROCESSES FOR MANUFACTURE OF BURYAKS

Volokha M.P.

Abstract. *Research of technological processes based on simulation, in particular agent-based modeling as one of its types, allows you to define process variables, their relationships and interactions, to highlight the technical and economic indicators, to assess the impact on profitability, to determine directions of development and ways of improvement of technical and technological base of the industry sugar beet.*

The analysis of the ability of a comprehensive study of the technology of sugar beet production through the development and application of simulation models. Study of parameters of technological processes of production of sugar beet is proposed to carry out the method of agent-based simulation that allows to simulate the technological process at different levels of aggregation of the indicators based on a common methodological approach. Statistics simulation a set of parameter values and their subsequent processing by statistical methods allow to analyze relations between the values of the parameters. In the end, the simulation results are used for decisionmaking about the choice of the optimal variant from the set of the admissible taking into account the criterion that expresses the efficiency of TP. The purpose of simulation of technological processes of production of sugar beet is to increase their productivity through the definition and justification of optimum parameters.

Волоха М. П.

Key words: *sugar beet, technological process, technical means, preplant tillage, sowing, field seed similarity, simulation modeling, agent, algorithm, visualization*