

**Дослідження та математичне моделювання процесу постачання сировини на цукровий завод з врахуванням генетико-детермінованих властивостей цукрових буряків.**

Svetlana Makovetska, Olena M'yakshylo, Sergiy Hribkov

С.В. Маковецька, О.М. М'якшило, С.В. Грибков

С.В. Маковецкая, Е.М. Мякшило, С.В. Грибков

**Анотація.** В статті розглядається проблема процесу формування ефективного постачання сировини на цукровий завод з метою скорочення втрат цукрози та підвищення техніко-економічних показників виробництва. Побудована математична модель охоплює усі аспекти процесу планування постачання сировини, для її переробки, з врахуванням генетико-детермінованих властивостей сучасних сортів та гібридів цукрових буряків. Проведено дослідження основних класичних методів розв'язку поставленої задачі. На основі проведеного аналізу сучасних методів складання розкладу зроблено висновок про доцільність вибору одного із евристичних методів.

**Аннотация.** В статье рассматривается проблема процесса формирования эффективной поставки сырья на сахарный завод с целью сокращения потерь сахарозы и повышения технико-экономических показателей производства. Построенная математическая модель охватывает все аспекты процесса планирования поставок сырья для ее переработки, с учетом генетико-детерминированных свойств современных сортов и гибридов сахарной свеклы. Проведено исследование основных классических методов решения поставленной задачи. На основе проведенного анализа современных методов составления расписания сделан вывод о целесообразности выбора одного из эвристических методов.

**Keywords:** hybrids of sugar beet, sugar, raw zone, criterion optimization, heuristic methods.

**Ключові слова:** гібриди цукрових буряків, цукристість, сировинна зона, критерій оптимізації, евристичні методи.

**Ключевые слова:** гибриды сахарной свеклы, сахаристость, сырьевая зона, критерий оптимизации, эвристические методы.

**Постановка проблеми.** Виробництво цукру – складний процес, який включає послідовність етапів від вирощування цукрових буряків до отримання готової продукції. Отримання високих якісно-кількісних показників при виготовленні цукру залежить від ефективної організації виробництва та дотримання технологічних вимог при постачанні, зберіганні та переробці кожної конкретної партії коренеплодів, тому що вона є унікальною, адже залежить від сорту гібрида цукрового буряка та конкретної сировинної зони [1].

Планування процесу виробництва цукру починається з планування посівів у відповідній сировинній зоні для раціонального забезпечення сировиною безперервної роботи заводу, під час усього сезону цукроваріння, з найбільшою економічною ефективністю.

Необхідно відмітити, що з кожним роком у буряківництво України впроваджуються нові види сортів та гібридів цукрових буряків різного селекційного походження. Нові сорти та гібриди вносяться у Державний реєстр сортів рослин придатних для поширення на території України. Кожен вид гібридів відмінний за своїми генетично-детермінованими властивостями лежкості, цукристості та показників врожайності.

Процес вирощування цукрового буряку є складним процесом, що залежить від багатьох факторів, тому прогнозований та фактично поставлений обсяг коренеплодів може сильно відрізнятись за своїми властивостями. Одними з основних факторів, які впливають на якість коренеплодів є погода, якість насіння, характеристики сировинної зони у сівозміні на ній, умови підживлення (внесення добрив), густина стояння рослин, терміни збирання урожаю, що не завжди підлягає точному визначенню [2]. Тому фактичне планування надходження цукрового буряка на приймальні пункти цукрового заводу

починається після проведення польових аналізів і тестів майбутньої сировини, що вимагає оперативного корегування плану надходження сировини на завод.

Таким чином, для отримання максимальних техніко-економічних показників виробництва необхідно організувати ефективне постачання сировини на завод, з конкретних сировинних зон, для забезпечення безперервного, ритмічного виробничого процесу з мінімальними втратами для кожної партії цукрового буряку.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання забезпечення цукрового заводу високопродуктивними гібридами різних термінів дозрівання, з метою збільшення виробництва якісної продукції, присвячені дослідження багатьох зарубіжних та вітчизняних вчених.

Зокрема, в публікації [1] розглянуто основні показники технологічної якості сучасних гібридів української селекції, переробка яких на цукрових заводах повною мірою відповідає вимогам технологічного процесу виготовлення цукру та забезпечує отримання високого виходу цукру з мінімальними втратами у мелясі, жомі та технологічних осадах. Результати досліджень генетично-детермінованих властивостей коренеплодів цукрових буряків, залежно від сорту, представлені у праці [3]. У роботі [4] проведена порівняльна характеристика з визначення показників технологічної якості і продуктивності вітчизняних гібридів та гібридів іноземної селекції. Авторами роботи [5] розглядається впровадження у виробництво нових гібридів цукрового буряку, що характеризуються більш високим потенціалом продуктивності та дають можливість підвищити отримання цукру з гектара посівів.

В публікації [6] розглядаються оптимальні строки збирання цукрових буряків, що сприяють збільшенню їх урожайності, підвищенню цукристості та технологічних якостей коренеплодів. Авторами праці [7] розглянуто моделі управління цукробуряковим виробництвом.

Проте, в розглянутих публікаціях недостатньо висвітлено питання забезпечення цукрових заводів коренеплодами за типами гібридів цукрового буряка, з урахуванням їх генетико-детермінованих властивостей, терміну дозрівання та сировинної зони, що є ресурсом для підвищенню техніко-економічних показників виробництва цукру.

**Постановка завдання.** Враховуюче вище зазначене, є актуальним дослідження та математичне моделювання постачання сировини на цукровий завод, для складання ефективного розкладу поставок, з метою скорочення втрат цукру і підвищення техніко-економічних показників виробництва.

**Виклад основного матеріалу.** Технологічний процес виробництва цукру є складним й неперервним. Він суттєво залежить від сировини, що надходить на переробку. Обсяги сировини та характеристики цукрових буряків, що надходять на завод, визначають тривалість виробничого сезону для цукрового виробництва, в залежності від потужності та стану технологічного обладнання цукрового заводу [4].

Більшість заводів цукрової промисловості маю значні втрати сировини при зберіганні та виробництві за рахунок ігнорування генетичної різноякісності цукрових буряків у розрізі окремих сортів і гібридів. У процесі селекції створено сорти з різним рівнем цукристості коренеплодів, показники якої лягли в основу віднесення сортів до трьох напрямів – врожайного (E), нормального (N) та цукристого (Z). Урожайний тип реалізує високий урожай цукру за високої урожайності коренеплодів, цукристий – за високого вмісту цукру, нормальний тип забезпечує високий урожай цукру обома компонентами у рівній мірі [5]. Гібриди врожайного напрямку забезпечують найвищий відсоток отримання цукру з гектара посівів, але менший його вихід з одиниці сировини. Коренеплоди цукристого напрямку відрізняються від попередньої групи меншою масою коренеплодів, але вищою їх цукристістю, що є більш стійкою ознакою і коливається у межах 14,4–18,6 % порівняно з 12,4–17,5 % у гібридів врожайного напрямку. Відповідно до їх генетичних характеристик вони мають

різні терміни досягання, умови зберігання, що впливають на цукристість коренеплодів в процесі їх обробки [5].

В українському буряківництві дуже важливим показником є термін біологічного дозрівання цукрових буряків, що визначає терміни їх збирання [6]

Основні сучасні гібридні сорти з їх характеристиками та термінами їх збирання представлені у таблиці 1. Наприклад: одним із сучасних гібридів цукрових буряків є сорт Геро, що відноситься до нормально-цукристих сортів з цукристістю 16,6%, врожайністю 69,0 ц/га і термінами збирання від 1-ої декади вересня до останньої декади листопада.

Гібриди, представлені у таблиці, є ранньо- та середньостиглими. Як видно з таблиці, основні види коренеплодів мають різні терміни біологічного дозрівання, що необхідно враховувати при плануванні їх збирання. Збирання коренеплодів планується по декадам з вересня по листопад, в залежності від їх біологічного дозрівання.

**Таблиця 1. Технологічні показники сучасних гібридів цукрових буряків**

Характеристики буряка				Терміни збирання								
Назва сорту буряка	Типи гібридів	Цукристість (%)	Врожайність (ц/га)	вересень			жовтень			листопад		
				декади			декади			декади		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Ахат	Z	16,7	69,3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Мерак	NZ	17,0	68,4		2	3	1	2	3	1	2	3
Вінцент	N	16,6	66,4		2	3	1	2	3	1	2	3
Мозаїк	NZ	16,9	64,0		2	3	1	2	3	1	2	3
Ремос	N	17,0	66,1		2	3	1	2	3	1	2	3
Тшбор	Z	17,2	66,7		2	3	1	2	3	1	2	3
Армін	N	17,0	68,5			3	1	2	3	1	2	3
Рональд	N	16,7	68,7		2	3	1	2	3	1	2	3
Логан	N	16,6	74,3			3	1	2	3	1	2	3

Басіліус	N	16,8	68,8			3	1	2	3	1	2	3
Пушкін	N	17,0	72,3		2	3	1	2	3	1	2	3
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Малус	N	16,9	74,5		2	3	1	2	3	1	2	3
Ліберо	N	16,6	71,1		2	3	1	2	3	1	2	3
Золеа	NZ	16,2	69,5		2	3	1	2	3	1	2	3
Берні	Z	17,4	68,9	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Веда	Z	16,9	71,2	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Варела	N	16,7	67,9		2	3	1	2	3	1	2	3
Вавілов	N	16,7	69,9	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ярослав	N	17,2	65,7		2	3	1	2	3	1	2	3
Ламарк	N	17,3	74,1		2	3	1	2	3	1	2	3
Акку	N	16,5	71,5		2	3	1	2	3	1	2	3
Віктор	NZ	17,0	67,4		2	3	1	2	3	1	2	3
Геро	NZ	16,6	69,0	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Вок	NZ	16,9	67,4		2	3	1	2	3	1	2	3
Нансен	N	16,8	71,9	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Яшин	N	16,6	73,8			3	1	2	3	1	2	3
Гуллівер	Z	17,2	75,5		2	3	1	2	3	1	2	3
Пінта	Z	17,0	70,0		2	3	1	2	3	1	2	3

Виходячи з вище зазначеного, враховуючи важливість забезпечення цукрового заводу сировиною з мінімальними втратами цукристості буряка, побудуємо математичну модель оптимізації поставок у вигляді цільової функції:

$$f = \sum_{j=1}^{t_i} \sum_{i=1}^k (x_{ij} - x_{ij} \cdot Z_i) \cdot C_i - \sum_{j=1}^{t_i} Tr_i \rightarrow \max \quad (1)$$

де  $x_{ij}$  - обсяг постачання цукрових буряків з  $i$ -ї сировинної зони, за кожний  $j$  – день надходження за весь період роботи цукрового заводу ( $j = 1 \dots t_i$ , від першого до останнього ( $t_i$ ) дня роботи надходження з  $i$ -ї сировинної зони),  $Z_i$  - коефіцієнт забрудненості коренеплодів цукрових буряків з  $i$ -ї сировинної зони;  $C_i$  - вміст цукру (дигестія) із коренеплодів цукрового буряка, що надходять з  $i$ -ї сировинної зони ( $i \in 1 \dots k$ ),  $k$  – кількість сировинних зон, з яких надходить

цукровий буряк,  $Tr_i$  - витрати на транспортування цукрових буряків з  $i$ -ї сировинної зони на приймальний пункт цукрового заводу.

Цільова функція (1) відповідає основній меті функціонування цукрового заводу, а саме: забезпечити максимальний вихід цукру з сировини, що надійшла на завод. Частковим критерієм оптимізації є максимізація вилучення цукрози з цукрового буряку, що надійшов з  $i$ -ї сировинної зони:

$$C_i = \sum_{j=1}^{t_i} c_{ij} \rightarrow \max \quad (2)$$

де  $c_{ij}$  - цукристість цукрового буряку, що надійшов з  $i$ -ї сировинної за кожний  $j$  – день надходження за весь період роботи цукрового заводу (від першого до останнього ( $t_i$ ) дня роботи надходження з  $i$ -ї сировинної зони).

Прогнозований виробіток цукрози з 1 гектара посівів (на фактично заготовлені буряки) сировинної зони бурякосіяння заводу [9]:

$$C_{i, np} = \frac{\left( x_i - \frac{x_i \cdot P_m}{100} \right)}{100 \cdot S_{убі}} V_c, \quad (3)$$

де  $P_m$  – прогнозовані втрати маси цукрових буряків відповідного гібрида при зберіганні та транспортуванні, прийнятих від  $i$ -го господарства, у відсотках до маси прийнятих буряків,  $V_c$  - прогнозований вихід цукрози, у відсотках до маси перероблених буряків;  $S_{убі}$  - площа сировинної зони посівів відповідного гібрида, га.

Прогнозований вихід цукру у відсотках до маси прийнятих коренеплодів визначаємо за формулою:

$$V_c = C_{np} - SB - C_m \quad (4)$$

де  $C_{np}$  – цукристість гібрида буряка за результатами визначення цукристості коренеплодів на пробних ділянках зони бурякосіяння цукрового заводу, у відсотках до маси буряків;  $SB$  - нормативна сума втрат цукрози від приймання до одержання готової продукції, % до маси заготовлених (прийнятих) буряків;  $C_m$  – нормативний вміст цукрози в мелясі, у відсотках до маси буряків. У виробничих умовах встановлено, що при однакових обсягів партій одного виду

цукрового буряку та з однаковою цукристістю коренеплодів обсяги виготовленої продукції неоднакові. В технологічному процесі виготовлення необхідно відмітити різницю вмісту цукрози в мелясі під час переробки свіжозібраних коренеплодів і після зберігання їх у кагатах, що також впливає на обсяги кінцевого продукту [2].

За рахунок того, що сировина має нечисту масу коренеплодів та надходить з певним відсотком забрудненості та засміченості, до яких відноситься земля, гичка, бокові корінці, солома, хвостики діаметром менше 1 см та інші домішки визначається коефіцієнт забрудненості ( $Z$ ) коренеплодів цукрових буряків визначається [8]:

$$Z = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100, \quad (5)$$

де  $m_1$  – вага цукрового буряку з домішками, кг;  $m_2$  – чиста вага цукрового буряку без домішок, кг.

На кожній сировинній зоні вирощується один сорт цукрового буряку, що забезпечує легкість в прогнозуванні врожайності того чи іншого виду. Фактично з конкретної сировинної зони надходить певний сорт коренеплодів, а також коефіцієнт забрудненості визначається до певної сировинної зони.

Витрати на транспортування цукрових буряків, прийнятих від  $i$ -ї сировинної зони на заготівельні пункти цукрового заводу у перерахунку на цукор [9]:

$$Tr_i = \sum_{j=1}^i ((x_i - Z_m) \cdot v_i \cdot r), \quad (6)$$

де  $Z_m$  – вага забрудненості та засміченості цукрових буряків, визначену на бурякоприймальних пунктах,  $v_i$  – відстань від  $i$ -ої сировинної зони до заводу,  $r$  (ц/ткм) – нормативний тариф на автоперевезення, виражений у кількості цукру в центнерах на один тонно-кілометр.

Постачання буряків відповідно з урахуванням біологічних термінів збирання гібридів коренеплодів на завод доцільно представити:

для ранньостиглих гібридів  $\sum_{\tau=1}^9 C_{\text{зуб},y} X_y = R_y$

для середньостиглих гібридів  $\sum_{\tau=2}^9 C_{\text{зуб},y} X_y = R_y$  (7)

для гібридів нормального типу  $\sum_{\tau=3}^9 C_{\text{зуб},y} X_y = R_y$ ,

де  $C_{\text{зуб},y}$  –цукристість буряка,  $R_y$  – обсяг цукрових буряків даного типу,  $\tau$  – декади дозрівання гібридів цукрового буряку (в межах від 1 декади вересня до 9 – останньої декади листопада),  $X_y$  – сумарний обсяг переробленого буряка відповідного гібрида

Виробничий сезон  $T$  в цукровій промисловості (кількість діб цукроваріння) один із найважливіших показників, так як він суттєво впливає на кінцевий результат виробничої діяльності підприємства і залежить від величини добової потужності цукрового заводу:

$$T = \frac{\sum_{y=1}^d x_{\text{зуб},y}}{P \cdot k_p}, \quad (8)$$

де  $x_{\text{зуб},y}$  - обсяг переробленого буряка відповідного гібриду,  $d$  – кількість гібридів, що прийнято на завод,  $y$  – вид гібрида,  $k_p$  - встановлений коефіцієнт використання потужності,  $P$ – добова потужність цукрового заводу.

Для забезпечення оптимальної роботи цукрового заводу на початку сезону необхідно сформуванати запас сировини на період від  $N$  до  $M$  діб:

$$N \cdot P \leq \sum_{j=1}^{t_i} \sum_{i=1}^k (x_{ij}) \leq M \cdot P \quad (8)$$

де  $N$  – 9-тиденний запас,  $M$  – 15-тиденний запас цукрового буряка. В залежності від характеристик заводу значення параметрів періоду запасів цукрового буряку може бути змінено.

Прогнозований обсяг постачання цукрового буряка відповідного гібрида  $X_{iy}$  за весь період з  $i$ -тої сировинної зони на цукровий завод визначаємо за формулою:

$$X_{iy} = \sum_{j=1}^{t_i} \sum_{i=1}^k x_{ij} \quad (9)$$

де  $i$  – сировинна зона,  $i \in 1 \dots k$ ,  $k$  – кількість сировинних зон, з яких надходить цукровий буряк,  $j$  – номер дня поставки за весь період роботи цукрового заводу ( $j = 1 \dots t_i$ , від першого до останнього ( $t_i$ ) дня роботи надходження з  $i$ -ї сировинної зони).

Для забезпечення оптимального завантаження цукрового заводу необхідно дотримуватися умови, того що прогнозований обсяг поставки цукрового буряку повинен бути неменше фактичної врожайності

$$X_{iy} \leq S_i \cdot U_y \quad (10)$$

де  $S_i$  – площа  $i$ -ї сировинної зони, га;  $U_y$  – урожайність коренеплодів за результатами визначення густоти насаджень та маси коренеплодів на пробних ділянках  $i$ -ї сировинної зони.

Задача формування ефективного розкладу постачання сировини з різних сировинних зон на цукровий завод для забезпечення скорочення виробничих витрат і підвищення техніко-економічних показників виробництва відноситься до класу NP-повних комбінаторних задач. Дана задача відноситься до задач календарного планування, а сформований варіант розкладу постачання сировини є можливість оцінити на оптимальність використовуючи критерії (1-2).

Існує багато класичних методів розв'язання задачі складання розкладу [11]. Модель задачі складання розкладу в рамках лінійного цілочисельного програмування [12] містить ряд недоліків, пов'язаних як з неповною адекватністю представленого розв'язку задачі, так і значною трудомісткістю використання запропонованого інформаційно-обчислювального комплексу, що вимагає участі кваліфікованого користувача. Метод імітації випалювання та алгоритм розфарбовування графу, незважаючи на зовнішню простоту, можуть виявитися цілком ефективними для складання лише невеликих розкладів. При реалізації алгоритму, що базується на принципах імітаційного моделювання

[12], обмежується можливість застосування розробленої системи на інших підприємствах цукрової галузі, крім того, знадобиться вносити істотні зміни в алгоритм при незначних внутрішніх змінах на підприємстві. Усі ці методи в своїй основі використовують ітераційну техніку неперервної оптимізації. Очевидно, що вони орієнтовані на пошук лише локальних оптимумів, а глобальний оптимум може бути знайдений лише випадково. У зв'язку з цим доцільно використовувати методи, що зберігають переваги класичних і вільні від їх недоліків. До таких методів відносять еволюційне моделювання [12]. Поставлена задача є комбінаторною, а вирішення її за умови значної кількості даних з використанням точних методів не є можливим, використання стандартних евристичних методів призводить до значних часових витрат, пов'язаних з високою обчислювальною складністю, при формуванні рішення та великої ймовірності відхилення знайденого рішення від оптимального [12]. Тому для вирішення задач такого класу доцільно використовувати евристичні методи, які дозволяють знайти оптимальний розв'язок задачі за короткий проміжок часу.

**Висновок.** В статті складено математичну модель постачання цукрових буряків на цукровий завод з урахуванням генетико-детермінованих властивостей із різних сировинних зон та розглянуто можливі «базові» підходи до вирішення задачі складання розкладу. Враховуючи специфічні особливості задачі, а також необхідність зменшення часу на її розв'язок необхідно дослідити сучасні методи оптимізації, що базуються на евристичних підходах. Кожен окремий підхід має свої переваги і недоліки, тому дуже складно однозначно підібрати конкретний метод розв'язку задачі, але доцільно використати комбінування евристичних методів..

#### Літературні джерела

1. Щоткін В. Агротехнологія вирощування цукрового буряку / В. Щоткін // Пропозиція. – 2001. – № 2. – С. 47–51.

2. Produktyvnist' i tehnologichni jakosti vitchyznjanyh gibrydiv cukrovych burjakiv na rivni svitovyh zrazkiv / V.P. Koval'chuk, I.I. Bojko, N.O. Kononjuk, I.R. Funina // Cukrovi burjaky. – 2014. – №5. – S.5–6.
3. Kljachenko O.L. Himichnyj sklad koreneplodiv cukrovych burjakiv v zalezhnosti vid sortovyh vidminnostej / O.L. Kljachenko, I.R. Funina // Naukovyj visnyk nacional'nogo agrarnogo universytetu. – 2002. – № 47. – S. 16–18.
4. Koval'chuk V.P. Biologichnyj potencial produktyvnosti vitchyznjanyh gibrydiv cukrovych burjakiv / V.P. Koval'chuk // Cukor Ukrainy №5 (77). – 2012. – S. 31–33.
5. Вахній С.П. Продуктивності цукру буряків залежно від сортових особливостей/ С.П.Вахній// Збірник наукових праць. Випуск 10. -2008. -С. 198-201.
6. Жолоб В.Д. Влияние удобрений и сроков уборки на продуктивность сахарной свеклы / В.Д. Жолоб, Е.А. Тонкаль // Селекция и агротехника – К.: ВНИС, 1982. – С. 96–103.
7. Бобов Г. Модель взаємодії учасників інтегрованого цукробурякового формування / Г. Бобов // Аграрна економіка. - 2012. - Т. 5, № 3-4. - С. 156-162.
8. Міністерство аграрної політики України, Наказ «Про затвердження Методичних рекомендацій з визначення показників вироблення цукру з 1 гектара посівів зони заготівлі цукрових буряків» від 18.12.2006 №779.
9. Правила приемки сахарной свеклы сахарными заводами без учета малосахаристых частей корнеплода. Режим доступа: <http://www.rossahar.ru/dokuments/priemka/>
10. Фридман С.Е. Справочник по заготовке, приемке и хранению сахарной свеклы / С.Е. Фридман, И.Ф. Селюк; под ред. С.Е. Фридмана. – М.: Пищевая промышленность, 1964 – 310.
11. Конвей Р. В. Теория расписаний. [Текст] / Р. В. Конвей, В. Л. Максвелл, Л. В. Миллер. — М.: Наука, 1975. — 360 с.

12. Безгинов А.Н. Обзор существующих методов составления расписания / А.Н. Безгинов, С.Ю. Трегубов // Информационные технологии и программирование: межвузовский сборник статей. – М. : МГИУ, 2005. – № 2(14) – С. 5 –18.