

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПІСЛЯЗБИРАЛЬНОЇ ОБРОБКИ СТЕВІЇ

**М.В. Роїк, доктор сільськогосподарських наук**  
**Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН**  
**І.В. Кузнєцова, кандидат технічних наук**  
**Національна академія аграрних наук України**

*Теоретичні та експериментальні дослідження стали основою створеної математичної моделі формування якісних показників стевії врожаю починаючи з її вирощування і завершуючи зберіганням листків. В основі математичної моделі також враховано пористість листкового апарату як одного з чинників, що залежить від температури сушіння і впливає на якість листків під час їх зберігання. На основі експериментальних даних розраховано швидкість руху сполук у клітинах листка, яка для стевії, вирощеної в агрокліматичних умовах України, не перевищує  $0,1 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{хв}$ .*

**Ключові слова:** стевія, післязбиральна обробка, дитерпенові глікозиди, пористість листків

**Постановка проблеми.** З розвитком аграрного сектору і наукового сегменту щодо забезпечення високоякісною сировиною харчової галузі набували також розвитку теоретичні та практичні основи вирощування і післязбиральної обробки рослинної сировини. Рослини такого типу як стевія відносяться до капілярно-пористих структур, які вимагають певного підходу щодо дотримання основних вимог до якості її листків. Актуальним для подальшого розвитку виробництва стевії є проведення комплексу теоретичних та експериментальних досліджень з управління якістю стевії, яка формується під час її вирощування та залежить від умов сушіння і зберігання.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** І.А. Худаноговим [1] запропоновано модель взаємодії енергетичних і продуктивних потоків у біологічному циклі вирощування рослинної сировини. Порушення одного з процесів технологічного циклу впливає насамперед на органолептичні показники, порушуючи тим самим технологічну якість листків. Це призводить до збільшення частки зруйнованої рослинної тканини і створюються сприятливі умови для окиснення сполук листків. Н.М. Кізілова [2] запропонувала модель масопереносу сполук з ґрунту через кореневу систему рослини до листкового апарату та видалення надлишкової частини вологи з поверхні листків у повітря. В основі моделі – мікроциркуляторна комірка листка, представлена у вигляді декартової системи координат (x, y, z) двома областями  $V_I$  і  $V_{II}$ , які заповнені анізотропними пористими сполуками. Розчинні речовини надходять через пористі стінки з області  $V_I$  в область  $V_{II}$  зі швидкістю, властивій кожній рослині згідно закону Г. Дарсі. Теорії фільтрування сполук у насиченій пористій системі присвячено також праці С. Ергуна, В.І. Аравіна, С.М. Нумерова, В.В. Шитова та інших вчених.

**Методика досліджень.** У наших дослідженнях використовували сушені

листки стевії сорту Берегиня селекції Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН, вирощеної на дослідній ділянці «Державного підприємства «Агрофірма Веселинівка»» (Київська обл.). Наважку ( $100 \pm 0,1$  г) сушених листків стевії подрібнювали до розміру часток  $0,63-1$  мм та екстрагували впродовж 5 год. за температури  $65-70$  °С. Баластні речовини видаляли осаджуванням 60%-м спиртом з наступним фільтруванням. Зміну компонентного стану в біосистемі листкового апарату визначали спектрофотометричним методом за довжини хвилі  $410$  нм у кюветі  $l = 1$  см.

Обробку експериментальних даних щодо ефективності зберігання листків стевії, сушених за різних температур [3], здійснювали за допомогою *MathCad*.

**Результати досліджень.** Листковий апарат – це система мікроциркуляторних комірок, які складаються з провідних елементів, оточених клітинами листкової пластинки [4]. Нами за отриманими ізотермами десорбції вологи з листків стевії та значенням активності води було встановлено, що листковий апарат стевії має мікропори (I тип) та пори клітинних стінок (II тип). Відповідно, діаметри цих пор становить як  $d_I = 10-500$  мкм та  $d_{II} = 0,1-5$  мкм. Також експериментально встановлено ефективний розмір пор листкового апарату, який становить  $d = 9,4-10,3$  мкм [5]. Відомо [6], що у I типі пор рух рідини визначається градієнтом гідростатичного тиску, II типі – осмотичними механізмами та здатністю живих клітин підтримувати певну внутріклітинну концентрацію розчинних речовин і тим самим забезпечує їх рух відповідно до градієнту осмотичного тиску в системі.

На нашу думку поглибити концептуальні положення щодо руху сполук з мікроциркуляторної комірки до поверхні листкового апарату можливо, врахувавши його пористість ( $m$ ). Рівняння нерозривності для швидкості переходу сполук і густини матиме вигляд:

$$\nabla \times (K(\rho) \nabla \rho) = (m \times P_a \times \kappa_1 + \rho \times \kappa_2) \times g \times \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (1)$$

Згідно моделі мікроциркуляторних комірок Кізілової Н.М. та врахувавши біологічні властивості стевії [2] впродовж зростання в області  $V_I$  буде змінюватись вміст вологи ( $W$ ), дитерпенових глікозидів ( $D$ ) та флавоноїдів ( $F$ ):

$$\frac{\partial W}{\partial x} + \frac{\partial D}{\partial y} + \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

Рух рідини та розчинних речовин в областях пор, що заповнені розчинами I (вода ( $W, w$ )), II (дитерпенові глікозиди ( $D, d$ )), III (флавоноїди ( $F, f$ )) представлені рівняннями нерозривності згідно закону Дарсі та рівняннями балансу для їх відповідних концентрацій  $c_I, c_{II}$  і  $c_{III}$ :

$$W = -\frac{K_x}{\mu} \times \frac{\partial P}{\partial x} \quad (3)$$

$$D = -\frac{K_y}{\mu} \times \frac{\partial P}{\partial y} \quad (4)$$

$$F = -\frac{K_z}{\mu} \times \frac{\partial P}{\partial z} \quad (5)$$

Для області  $V_I$  мікроциркуляторної комірки рівняння як функція координат буде мати наступний вигляд:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(c_I \times W) + \frac{\partial}{\partial y}(c_{II} \times D) + \frac{\partial}{\partial z}(c_{III} \times F) = D_c \times \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

В області  $V_{II}$ :

$$\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial d}{\partial y} + \frac{\partial f}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

Баланс сполук у мікроциркуляторній комірці буде представлений системою рівнянь:

$$w = -\frac{k_x}{\mu} \times \left( \frac{\partial \rho}{\partial x} - \zeta \times \frac{\partial \pi}{\partial x} \right) \quad (8)$$

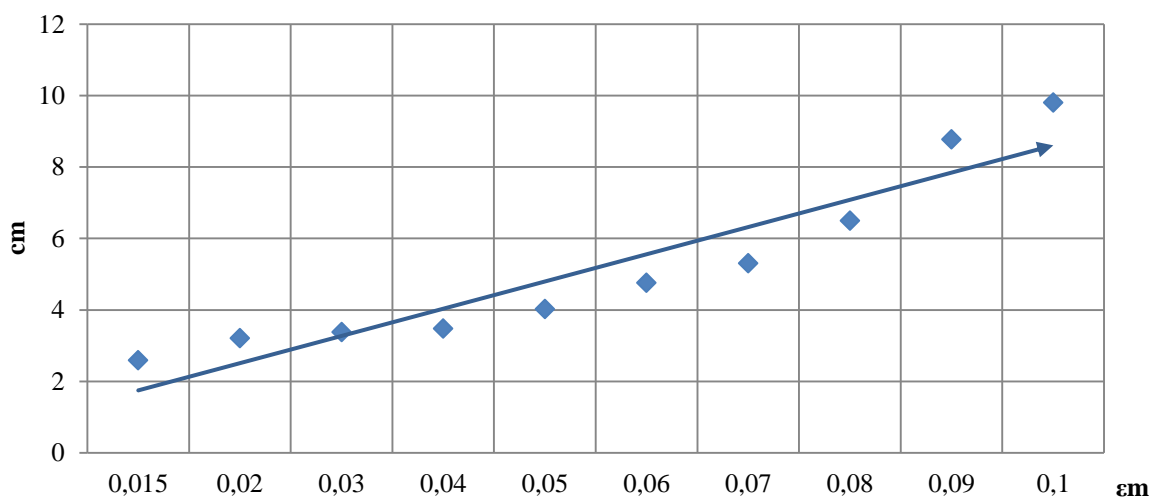
$$d = -\frac{k_y}{\mu} \times \left( \frac{\partial \rho}{\partial y} - \zeta \times \frac{\partial \pi}{\partial y} \right) \quad (9)$$

$$f = -\frac{k_z}{\mu} \times \left( \frac{\partial \rho}{\partial z} - \zeta \times \frac{\partial \pi}{\partial z} \right) \quad (10)$$

Відповідно, для області  $V_{II}$  мікроциркуляторної комірки рівняння як функція координат буде мати наступний вигляд:

$$\frac{\partial B}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(c_I \times w) + \frac{\partial}{\partial y}(c_{II} \times d) + \frac{\partial}{\partial z}(c_{III} \times f) = D_B \times \left( \frac{\partial^2 B}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial z^2} \right) - q_B \quad (11)$$

Крім фізичних механізмів існує складний регуляторний вплив концентрацій іонів рослинного соку на проникність клітин. Вилучення вологи здійснюється з поверхні клітинних стінок у міжклітинний простір і через породи на поверхню листкового апарату та у повітря. Визначали коефіцієнт екстинції ( $\varepsilon m$ ) в очищеному зразку екстракту (рис. 1), який впливає на швидкість переходу речовин ( $cm$ ) у мікроциркуляторних комірках листкового апарату.



**Рис. 1. Вплив коефіцієнту екстинції на концентрацію сполук у біосистемі листкового апарату.**

Графічна залежність показує, що тривалість релаксації концентрацій сполук тим більше, чим більші їх початкові значення порівняно із стаціонарними. Високі концентрації сполук стимулюють відповідні потоки на межі поділу фаз між різними сполуками. Безмірна транспірація значень коефіцієнту екстинції, який залежить від пористості листкового апарату, показує швидкість дифузії сполук у мікроциркуляторних комірках листка в

розчин. Отримані дослідження показують, що коефіцієнт екстинції не може бути більшим за 0,1 якщо вміст дитерпенових речовин не перевищує 11%. Таким чином, швидкість дифузії ( $\varepsilon_w$ ) дитерпенових глікозидів у листках сорту Берегиня не перевищить  $0,1 \times 10^{-3}$  м<sup>2</sup>/хв.

Рівняння 13 являє продуктивні потоки при вирощуванні [1]:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = d_1 Q_1 - d_2 Q_2 \quad (13)$$

де  $M$  – продуктивна маса у певний проміжок часу ( $t$ ), кг;  $Q_1$  – накопичення біомаси під час фотосинтезу, кг/с;  $Q_2$  – втрати біомаси під час дихання у процесі вегетації, кг/с;  $d_1, d_2$ , – сталі коефіцієнти.

Після зрізання наземної частини стеви зупиняються процеси накопичення сполук у листках. Проте, посилюється процес видалення вологи, яка стає надлишковою. Таким чином, загальне рівняння витрат у біосистемі листка буде мати вигляд:

$$d_1 Q_1 - d_2 Q_2 = 2 \times \left( \frac{L \times ((1-r) \times k_2 \times K_2)}{h} \right) \times ((H-a) \times (\varepsilon_2'' + \varepsilon_1') + 2a) \times \varepsilon_w, \quad (14)$$

де  $H, a, L$  – розміри листка (відповідно висота, ширина і товщина), см;  $\varepsilon_2'', \varepsilon_1'$  - коефіцієнти екстинції переходу основних сполук у клітинах,  $K_2$  – значення питомого дихання;  $k_2$  – сталий коефіцієнт інтенсивності дихання;  $r$  – коефіцієнт пропорційності основних розмірів як співвідношення проекції площі, що займають рослини, до площі поверхні листків

При зберіганні листків стеви за оптимальних умов відбуваються витрати сполук для підтримання на належному рівні тургору листового апарату. За експериментальними даними щодо втрат дитерпенових глікозидів у сухих листках стеви під час зберігання визначили рівняння регресії процесу дихання, яке буде мати вигляд:

$$f(t, \tau) = 11,009 - 2,797 \times 10^{-3} \times t - 0,027 \times \tau - 5,984 \times 10^{-6} + 2,707 \times 10^{-7} t^2 + 6,845 \times 10^{-4} \times \tau^2, \quad (15)$$

де  $t$  (С) – температура сушіння;  $\tau$  (В) – тривалість зберігання сушених листків.

**Висновки.** На основі теоретичних та власних експериментальних досліджень щодо руху сполук під час вирощування у рослині до листового апарату та визначення оптимального часу, за якого рослина набуває максимальний біологічний розвиток, створено математичну модель накопичення основних сполук у листках під час вирощування стеви, яка враховує пористість листків. Експериментально показано, що коефіцієнт екстинції не може бути більшим за 0,1 якщо вміст дитерпенових речовин у листках стеви не перевищує 11%. При цьому швидкість дифузії ( $\varepsilon_w$ ) дитерпенових глікозидів у листках стеви сорту Берегиня не перевищить  $0,1 \times 10^{-3}$  м<sup>2</sup>/хв. Отримано рівняння регресії, яке описує ефективність зберігання листків залежно від температури сушіння та тривалості зберігання.

## Література

1. Худоногов И.А. Ресурсосберегающие методы управления ИК-энергоподводом в процессах производства оздоровительного чая / И.А. Худоногов // автореф. на соискание степени докт. техн. наук. – Красноярск,

2009. – С.40.

2. Кизилова Н.Н. Фильтрация жидкости в микроциркуляторной ячейке листа растения: получение и исследование модели с сосредоточенными параметрами / Н.Н. Кизилова // Прикладна гідромеханіка. –2005. – Т.7. – №2. – С. 33–43.

3. Кузнецова І.В. Зміна якісних показників листя стевії (*Stevia rebaudiana Bertoni*) впродовж зберігання / І.В. Кузнецова // Цукрові буряки. – 2014. – №1 – С. 18–19.

4. Кузнецова И.В. Роль процесса высушивания в послеуборочной обработке стевии (*Stevia rebaudiana Bertoni*) / И.В. Кузнецова // Сахарная свекла.– 2014.– №8. – С. 41–44.

5. Патент України № 92159 на корисну модель МПК<sup>14</sup> С07Н15/00, В01J39/00, В01J49/00 Спосіб визначення основних показників пористості / Роїк М.В., Кузнецова І.В; заяв. патентоволодар Київ. Ін-т біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН. - u201407509. Заявл. 04.07.2014 р. Опубл. 10.12.2014 р. бюл. №23.

6. Либберт Э. Физиология растений / Э. Либберт. – М.: Мир, 1976. – 314 с.

## References

1. Khudonogov I.A. (2006). To keep resources in the processes of production of making healthy expecting the methods of management IR-energyadmission. *Dr. tech. sci. diss.* Krasnoyarsk, 2006. 40 p. (in Russian).

2. Kizilova, N.N. Filtration of liquid in mikro to circulate the cell of sheet of plant: receipt and research of model with the concentrated parameters. The applied gidromechanics, 2005. Т.7. no. 2, pp. 33-43. (in Russian).

3. Kuznetchova, I.V. A change of high-quality indexes of leaves of stevia (*Stevia rebaudiana Bertoni*) is during storage. The Sugar beets, 2014. no. 1, pp. 18-19. (in Ukrainian)

4. Kuznetchova, I.V. A role of process of drying is in after harvest treatment of stevia (*Stevia rebaudiana Bertoni*). The Sugar beets, 2014, - no. 8, pp. 41-44. (in Russian).

5. Patent of Ukrainian 92159 Method of determination of basic indexes of porosity / Royk M.V., Kuznetchova, I.V.; Kyiv. Publ. 10.12.2014. no. 23.

6. Libbert, E. (1976). *Physiology plants* . Moscow, 1976, 314 p. (In Russian).

Одержано 27. 10. 2015

## Анотация

**Роик Н.В., Кузнецова И.В.**

### **Математическая модель послеуборочной обработки стевии**

Теоретические и экспериментальные исследования стали основой созданной математической модели формирования качественных показателей стевии, начиная с её возделывания и заканчивая хранением сушеных листьев. При разработке модели стевии использовано гидростатическую математическую модель, описывающую механизм накопления веществ в листьях растений и установления их баланса благодаря дыханию. На уровне микроциркуляторных ячеек клеток было представлено движение веществ под осмотическим давлением с корневой системы. Другая математическая модель, которая также стала основой для разработки новой, показывает взаимодействие двух энергетических систем, определяющих физиологическую зрелость растения. Обобщение

двух моделей дало возможность создать новую математическую модель выращивания стевии до достижения её физиологической зрелости. При создании модели также включено один из основных показателей качества – пористость листьев, который зависит от природы растения и условий сушения, а также влияет на качество листьев во время их хранения. Математическая модель также учитывает время биологического цикла растения, которых характеризует его готовность к заготовке и дальнейшей переработке. Таким образом, данная модель позволяет рассчитать завершение биологического цикла в определённых агроклиматических условиях. Исследования очищенного от балластных веществ сока листьев стевии показывают, что время релаксации концентраций веществ тем больше чем больше их исходные значения по сравнению с стационарными. Высокие концентрации веществ стимулируют соответственные потоки на границе разделения фаз между разными веществами. Безмерная транспирация значений коэффициента экстинкции, который зависит от пористости листового аппарата, показывает скорость диффузии веществ в микроциркуляторных ячейках листка в вещество. Полученные исследования показывают, что коэффициент экстинкции не может быть большим за 0,1 если содержание дитерпеновых веществ не превышает 11%. На основе проведенных экспериментальных исследований по скорости движения веществ в клетках листьев установлено, что данный показатель не превышает  $0,1 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{мин}$ . для стевии выращенной в агроклиматических условиях Украины.

Обработка результатов исследований изменения содержания влаги, дитерпеновых гликозидов и флавоноидов на протяжении двух лет образцов листьев стевии сушеных при различной температуре стали основой уравнения регрессии. Обработка данных позволила получить коэффициенты характеризующие степень влияния одного из двух параметров использованных при сушке наземной части стевии: температура и время.

Таким образом, проведенные теоретические и экспериментальные исследования стали основой для получения математической модели выращивания стевии и уравнения регрессии хранения её листьев.

Ключевые слова: стевия, послеуборочная обработка, дитерпеновые гликозиды, пористость листьев

#### **Annotation**

**Roik N.V., Kuznetsova I.V.**

#### **Mathematical model of stevia post-harvest processing**

Theoretical and experimental studies became basis for the created mathematical model of forming high-quality indicators of stevia starting with its cultivation and ending with storage of dried leaves. Developing stevia model a hydrostatical mathematical model was used describing the mechanism of accumulating substances in plant leaves and establishing their balance due to breathing. At the level of microcirculatory cellules of cells movement of substances at the osmotic pressure from the root system was represented. Other mathematical model which also became the basis for developing a new one shows co-operation of two power systems determining physiological maturity of a plant. When creating the model one of basic quality indicators – porosity of leaves which depends on nature of the plant and drying conditions and also affects the quality of leaves during their storage is included. The mathematical model also takes into account time of the biological cycle of a plant which is characterized by its readiness for harvesting and further processing. Thus, this model allows expecting completion of the biological cycle in certain agroclimatic terms. Studies of purified from ballast substances juice of stevia leaves show that the more relaxation time of concentrations of the substances the more their original values compared to stationary ones. High concentrations of substances are stimulated by conformable streams on the border of phase division between different matters. Immeasurable transpiration of values of the extinction coefficient which depends on the porosity of the leaf apparatus shows the diffusion rate of substances in microcirculatory cells of a leaf into substance. The resulting studies show that the extinction coefficient cannot be large over 0.1 if the content of diterpenic substances does not exceed 11%. On the basis of conducted

*experimental researches on speed of moving substances cells of leaves it is found that this indicator does not exceed  $0.1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{min}$ . for stevia grown in agroclimatic terms of Ukraine.*

*Processing the results of studies on changes in moisture content, diterpene glycosides and flavonoids for two years, samples of stevia leaves dried at different temperatures were the basis of the regression equation. Data processing allows obtaining coefficients characterizing the degree of influence of one of the two parameters used during drying of the ground part of stevia: temperature and time.*

*Thus, conducted theoretical and experimental studies became the basis for obtaining mathematical model of stevia growing and regression equation of storing its leaves.*

**Key words:** *stevia, post-harvest processing, diterpene glycosides, porosity of leaves*

**UDC 631.51.021:633.85**

## **INFLUENCE OF PECULARITIES OF PRIMARY CULTIVATION ON ITS AGROPHYSICAL INDICATORS OF FERTILITY AND WATER REGIME WHEN GROWING SPRING RAPE**

**L.M. Savranska, Candidate of Agricultural Sciences  
S.P. Poltoretskyi, Doctor of Agricultural Sciences  
Uman National University of Horticulture**

*Наведено аналітичний огляд вітчизняних і зарубіжних літературних джерел, щодо впливу різних способів і глибин основного обробітку ґрунту на агрофізичні показники родючості ґрунту, а також його водний режим. Встановлено, що існуючі рекомендації містять недостатньо інформації про оптимізацію основного обробітку ґрунту під ріпак ярий. До того ж, питання заміни полицевого обробітку безполицевим після стерньового попередника практично не висвітлене. Мало даних і про вплив глибини оранки та плоскорізного розпушування на умови росту, розвитку і продуктивність ріпака ярого на чорноземах опідзолених.*

**Ключові слова:** *ріпак ярий, спосіб і глибина основного обробітку ґрунту, агрофізичні показники родючості ґрунту, водний режим ґрунту.*

Agriculture of Ukraine during its reforming is characterized by instability of production, land depletion, deterioration of material and technical base, reduction of capital investment and increasing social tensions. Course on market reforms in the short term did not improve the situation in the field because of lack of competitiveness of crop production, in cost structure of which a large share of expenses for mechanical tillage and basic one occupies in particular.

One way to reduce the cost of manufactured products is minimizing tillage based on the reducing of basic tillage depth and introducing other less energy-intensive primary tillage instead of moldboard plowing [1].

In current economic conditions when economically profitable crops are grown mainly (among cereals – winter wheat, among oil crops – sunflower), schemes of crop rotations and structure of sown areas are violated resulting crops are not provided with good predecessors and their yield is reduced due to deterioration of the physical, chemical and phytosanitary state of fields. To solve