

Т. В. Шейко,  
З. П. Мельник, канд. техн. наук, доц.  
*Національний університет харчових технологій*

## **МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ РЕГЕНЕРАЦІЇ ШУНГІТА**

*Розроблена математична модель процесу регенерації шунгіта перегрітою парою та доведена її адекватність. Проведена оптимізація процесу регенерації і встановлені оптимальні параметри десорбції домішок із поверхні шунгіта.*

***Ключові слова:** шунгіт, регенерація, математична модель, оптимізація.*

В процесі адсорбційного очищення соку столового буряка поверхня і пори природного вуглецевовмісного мінерала — шунгіта заповнюються адсорбованими домішками, внаслідок чого адсорбуюча спроможність мінерала поступово падає. Для її відновлення (десорбції) було поставлено за мету підібрати ефективний метод регенерації адсорбента.

© Т.В. Шейко, З.П. Мельник, 2011

Керуючись літературними джерелами [1,2], зосередили увагу на методі низькотемпературної термічної регенерації шунгіта, що включає обробку сорбента парою.

Для ведення процесу регенерації шунгіта необхідно керуватися найефективнішими технологічними параметрами, які можна отримати за допомогою методів оптимізації.

Для розробки математичної моделі процесу регенерації шунгіта перегрітою водяною парою було використано рототабельне планування другого порядку [3,4]. В якості функції відклику вибрана кількість адсорбованих домішок із соку столового буряка, яка оцінювалась

ефектом очищення, %), а у якості змінних факторів — температура пари ( $x_1$ ) та тривалість регенерації (витрати пари) ( $x_2$ ). Рівні факторів та інтервали їх зміни наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Рівні та інтервали зміни факторів

| Фактори                    |            | Інтервали зміни |       |       |     |       |       |
|----------------------------|------------|-----------------|-------|-------|-----|-------|-------|
| найменування               | позначення | кодовані        |       |       |     |       |       |
|                            | натуральне | кодоване        | -1,41 | -1    | 0   | +1    | +1,41 |
| Температура пари, °C       | $t_n$      | $x_1$           | 140   | 145,8 | 160 | 174,2 |       |
|                            | 180        |                 |       |       |     |       |       |
| Тривалість регенерації, хв | $\tau$     | $x_2$           | 10    | 13    | 20  | 27    | 30    |

Інтервали зміни температури від 140°C до 180°C та тривалості регенерації шунгіта 10...30 хвилин було вибрано після аналізу попередньо проведених досліджень.

Згідно розробленого плану експеримента з двома факторами і при заданому значенні зоряних точок  $\alpha = 1.41$  було реалізовано 13 дослідів, причому 5 із них було проведено в центрі області факторного простору.

Щоб виключити вплив систематичних похибок, які можуть бути викликані зовнішніми умовами (зміною температури навколишнього середовища, зразків і т.п.), була вибрана випадкова послідовність проведення дослідів — рандомізація. Використовуючи таблиці випадкових чисел, була вибрана наступна послідовність проведення досліджень:

2, 9, 5, 1, 3, 7, 12, 11, 8, 4, 6, 13, 12.

Всі дослідження проводили при тиску пари  $P_M=0,3$  МПа і постійною витратою пари  $m=2,305 \cdot 10^{-3}$  кг/с ( $\approx 8,3$  кг/год).

Кожний дослід проводили три рази і для кожного досліду розраховували дисперсію ( $S_i$ ) за рівнянням:

$$S_i^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}, \quad (1)$$

Середнє квадратичне відхилення знаходили:

$$S_i = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}}, \quad (2)$$

$\bar{y}$  — середнє значення аргументу в досліді;

$y_i$  — значення  $i$ -того аргументу;

$n$  — кількість дослідів.

Результати проведених обчислень наведені в табл. 2.

Однорідність отриманих дисперсій перевіряли по критерію Кохрена:

$$G_p = \frac{S_{i\max}^2}{\sum_{i=1}^n S_i^2} = \frac{1,12}{4,57} = 0,245, \quad (3)$$

**Таблиця 2. План проведення експеримента та експериментальні і розрахункові дані**

| № п/п | $x_1$ | $x_2$ | $x_1 x_2 x_2^2$ | $x_2^3$ | Відновлювана |       |       |           |           |                     |         |  |
|-------|-------|-------|-----------------|---------|--------------|-------|-------|-----------|-----------|---------------------|---------|--|
|       |       |       |                 |         | $y_1$        | $y_2$ | $y_3$ | $\bar{y}$ | $\hat{y}$ | $\bar{y} - \hat{y}$ | $S_i^2$ |  |
| 1     | +     | +     | +               | +       | 34.0         | 32.0  | 33.6  | 33.2      | 34.25     | 1.102               | 1.12    |  |
|       |       |       |                 |         |              |       |       |           |           |                     | 1.058   |  |
| 2     | -     | +     | -               | +       | 24.0         | 22.0  | 23.0  | 23.0      | 22.69     | 0.096               | 1.00    |  |
|       |       |       |                 |         |              |       |       |           |           |                     | 1.000   |  |
| 3     | +     | -     | -               | +       | 21.4         | 20.6  | 21.0  | 21.0      | 21.52     | 0.270               | 0.16    |  |
|       |       |       |                 |         |              |       |       |           |           |                     | 0.400   |  |
| 4     | -     | -     | +               | +       | 18.5         | 19.0  | 19.5  | 19.0      | 18.16     | 0.706               | 1.00    |  |
|       |       |       |                 |         |              |       |       |           |           |                     | 1.000   |  |
| 5     | +1.41 | 0     | 0               | 2       | 30.5         | 29.5  | 30.0  | 30.0      | 28.83     | 1.369               | 0.25    |  |
|       |       |       |                 |         |              |       |       |           |           |                     | 0.500   |  |
| 6     | -1.41 | 0     | 0               | 2       | 17.5         | 17.0  | 18.0  | 17.5      | 18.32     | 0.672               | 0.25    |  |
|       |       |       |                 |         |              |       |       |           |           |                     | 0.500   |  |



Табличне значення для нашого випадку становить  $t_{табл} = 4,3$ . Так як  $t_{розра} < t_{табл}$ , то цей дослід не є сумнівним, як і всі інші, в яких відхилення отриманих результатів є меншим.

Як уже було зазначено в якості математичної моделі був вибраний поліном другого порядку:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2. \quad (6)$$

Пошук коефіцієнтів цього рівняння проводимо згідно методики [5]:

$$1) \quad b_0 = \delta_0' \sum_{u=1}^n \bar{y} - \delta_0'' \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^n x_{iu}^2 \cdot \bar{y}_u,$$

де  $\delta_0' = 0,2$  і  $\delta_0'' = 0,1$  — коефіцієнти регресії згідно табл. 24 [5].

$$\text{У нашому випадку } \sum_{u=1}^n \bar{y} = 351,4, \text{ а } \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^n x_{iu}^2 \cdot \bar{y} = 387$$

$$b_0 = 0,20 \cdot 354,1 - 0,1 \cdot 387 = 31,54$$

$$2) \quad b_1 = \delta_i \sum_{i=1}^k x_{iu} \cdot y_u;$$

$\delta_i = 0,125$  — коефіцієнт регресії по табл. 23 [5]. У нашому випадку

$$\sum_{i=1}^k x_{iu} \cdot y_u = 29,825, \text{ а}$$

$$b_1 = 0,125 \cdot 29,825 = 3,728$$

3)  $b_2 = \delta_i \sum_{i=1}^k x_{iu} \cdot y_u$  — аналогічно випадку 2, і тому

$$b_2 = 0,125 \cdot 34,53 = 4,322$$

4)  $b_{12}$  знаходимо по формулі:

$$b_{ij} = \delta_{ij} \sum_{u=1}^n x_{iu} \cdot x_{ju} \cdot y_u; \quad (7)$$

$\delta_{ij} = 0,25$  табл. 23 [5]

$$b_{12} = 0,25 \cdot 8,2 = 2,05$$

5)  $b_{11}$  знаходимо з рівняння:

$$b_{ii} = \delta_{ii}' \sum_{u=1}^n x_{iu}^2 \cdot y + \delta_{ii}'' \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^n x_{iu}^2 \cdot y - \delta_{ii}''' \sum_{i=1}^k y_u,$$

де  $\delta_{ii}' = 0,125$ ;  $\delta_{ii}'' = 0,01875$ ;  $\delta_{ii}''' = 0,1$  (табл. 23 [5]).

Звідси  $b_{11} = -3,982$

б) Значення коефіцієнта  $b_{22}$  знаходимо по аналогії з п. 5

$$b_{22} = -3,41$$

Отримане рівняння в кодованих координатах має вигляд:

$$y = 31,58 + 3,728x_1 + 4,321x_2 + 2,05x_1x_2 - 3,982x_1^2 - 3,41x_2^2 \quad (8)$$

Згідно цього рівняння для кожного дослідів розраховуємо значення  $y_{розра} = \hat{y}$  і заносимо їх у табл. 2. Перевіряємо отримане рівняння на адекватність по критерію Фішера:

1) дисперсія адекватності:

$$S_{ад}^2 = \frac{u \sum_{i=1}^n (y - \hat{y})^2}{N - \lambda}, \quad (9)$$

де  $N$ — число незалежних дослідів ( $N=9$ );

$\lambda$  — число значущих коефіцієнтів рівняння ( $\lambda=6$ );

$u$ — число паралельних дослідів ( $u=3$ ).

$$S_{ад}^2 = \frac{3 \cdot 4,6985}{9 - 6} = 4,6985$$

$$S_y^2 = 4,58$$

Критерій Фішера:

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2} = \frac{4,6985}{4,58} = 1,026. \quad (10)$$

У нашому випадку табличне значення критерія Фішера складає  $F_{табл} = 3,16$  (для  $q = 0,05$ ,  $f_{ад} = 3$ ,  $f_E = 18$ ). Так як  $F < F_{табл}$ , то отримана математична модель є адекватною. Тепер можна перевести рівняння з кодованих у натуральні величини, для цього використовуємо дані табл. 1.

$$x_1 = \frac{t_n - 160}{14,2}; \quad x_2 = \frac{\tau - 20}{7}$$

де  $t_n$ — температура перегрітої пари, °С;

$\tau$ — тривалість регенерації, хв.

Отримали рівняння:

$$y = 31,58 + 3,728 \left( \frac{t_n - 160}{14,2} \right) + 4,321 \left( \frac{\tau - 20}{7} \right) + 2,05 \left( \frac{t_n - 160}{14,2} \right) \cdot \left( \frac{\tau - 20}{7} \right) - 3,982 \left( \frac{t_n - 160}{14,2} \right)^2 - 3,41 \left( \frac{\tau - 20}{7} \right)^2 - 490,488 + 6,173t_n + 0,0923\tau + 0,0206t_n \cdot \tau - 0,01976t_n^2 - 0,06939\tau^2$$

У вибраному діапазоні температур 140...180 °С і тривалості процесу регенерації 10...30 хвилин, побудуємо графік залежності ефекту очищення соку регенованим шунгітом від температури і тривалості регенерації.

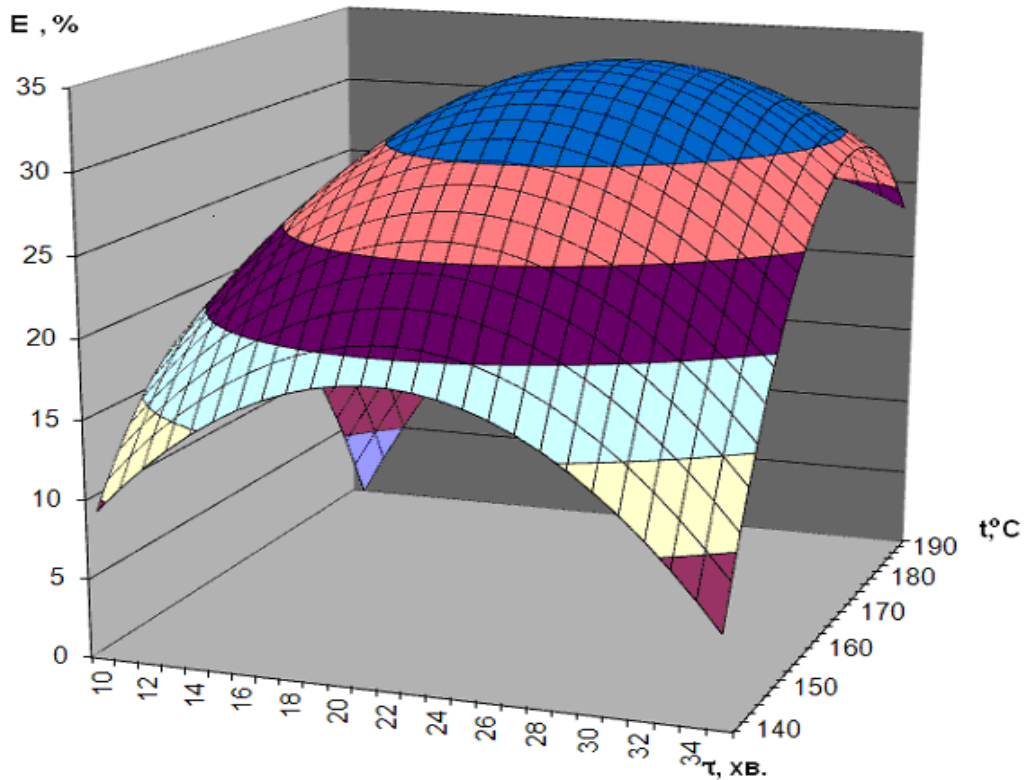


Рис 1. Залежність ефекту очищення соку столового буряка регенованим шунгітом від температури і тривалості регенерації.

Аналіз результатів, представлених на рис. 1, дає можливість стверджувати, що найкращий ефект очищення соку столового буряка від пектинових речовин 34,66 % досягаємо при регенерації шунгіта перегрітою парою при температурі 170 °С і тривалості 26 хв. Теоретичні розрахунки були підтверджені результатами практичних випробувань. Похибка склала:

$$\delta = \left| \frac{34,66 - 33,5}{34,66} \right| \cdot 100 = 3,35\%,$$

що в межах допустимих норм.

**Висновки:**

1. Для зниження собівартості при виробництві соку столового буряка доцільно багатократно використовувати шунгіт, який здатний поглинати частину шкідливих домішок.

2. Отримана математична модель стала основою оптимізації процесу регенерації шунгіта перегрітою парою.

3. Перевірка моделі на адекватність дала позитивний результат.

4. Отримано оптимальні параметри регенерації шунгіта перегрітою водяною парою:  $t = 170$  °С, тривалість 26 хв. При цьому досягається максимальне поглинання домішок, що рівноцінно ефекту очищення в 34,7 %.

### **ЛІТЕРАТУРА**

1. *Горштейн А. Е* Адсорбционные свойства шунгитов/ Горштейн и др.// Изв. ВУЗов «Химия и химические технологии».— М.: 1979. — Т. 22, № 6. — С. 711 – 715.

2. *Елецкий А. В.* Фуллерены и структуры углерода/ Елецкий А.В., Смирнов Б.М. // Успехи физических наук.— 1995. — Т. 165, № 9. — С. 977 – 990.

3. *Закгейм А.Ю.* Введение в моделирование химико-технологических процессов / Закгейм А.Ю. — М.: Химия, 1982.— 233 с.

4. *Алексеев Е.Л.* Моделирование и оптимизация технологических процессов в пищевой промышленности / Е.Л. Алексеев, В.Ф. Пахомов. — М.: Агропромиздат, 1988. — 273с.

5. *Винарский М.С.* Планирование эксперимента в технологических исследованиях/ Винарский М.С., Лурье М.В. -К.: Техника, 1975. — 168 с.

*Одержана редколлегією 15.09.2011 р.*

Т.В. Шейко, З.П. Мельник,

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА РЕГЕНЕРАЦИИ ШУНГИТА**

*Разработана математическая модель процесса регенерации шунгита перегретым паром и доказана ее адекватность. Проведена оптимизация процесса регенерации и установлены оптимальные параметры десорбции примесей из поверхности шунгита.*

**Ключевые слова:** *шунгит, регенерация, математическая модель, оптимизация.*

T. Sheiko, Z. Melnik,

## **DESIGN AND OPTIMIZATION OF THE PROCESS OF REGENERATION OF SHUNGITE**

*A mathematical model for the process of regenerating shungite by over-heated steam has been elaborated and its feasibility has been also proved. Optimization of the regeneration process has been done and optimal parameters for desorbing impurities from shungite surface have been established.*

**Key words:** *shunhit, regeneration, mathematical model, optimization.*