

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОЛОГОПЕРЕНОСУ В МАСИВІ ЦУКРУ-ПІСКУ ПРИ ТРИВАЛОМУ ЗБЕРІГАННІ.

М. М. Масліков, **В. М. Пахомов**, М. О. Прядко.

Український Державний Університет харчових технологій.

Запропоновано математичну модель тепловологопереносу у масиві цукру-піску, що базується на новому потенціалі масообміну. На базі моделі створено програму розрахунку полів температури та потенціалів вологопереносу для дослідження процесу зберігання цукру.

Проблема раціонального зберігання цукру загострюється зі зростанням потужності цукрових заводів. Значна частина складів цукрових заводів неопалювані, на більшості інших системи опалення хоча й встановлені, але не експлуатуються з різних причин. Діючі нормативні документи [1,2] передбачають охолодження цукру перед зберіганням до температури, що не перевищує 25°C. Тому цукор у виробничий сезон закладають на зберігання з температурою, значно вищою за температуру навколишнього повітря. Через це в штабелях при тривалому зберіганні у неопалюваних складах виникають значні градієнти температури та потенціалу вологопереносу, внаслідок чого у масі цукру розвиваються процеси переносу теплоти та вологи.

Волога з повітря тепліших областей мігрує до холодніших за рахунок різниці парціальних тисків [3,4]. У тепліших областях відбувається підсушування цукру. Випаровування вологи з міжкристалльних плівок розчину веде до утворення кристалічних «містків» між окремими кристалами. Таким чином, у масі цукру

відбувається процес грудкування. Під дією цього процесу, а також зовнішнього тиску у штабелі чи силосі цукор-пісок втрачає текучість, утворюючи агломерати [4,5,6].

У холодніших областях внаслідок сорбції вологи йде розчинення поверхонь кристалів цукру. Плівки розчину, що оточують сусідні кристали, зливаються між собою, і у разі подальшого підсушування йде грудкування. Крім того, у цих областях цукор перебуває з підвищеною вологістю. Зберігання за таких умов призводить до погіршення його якості внаслідок гідролізу цукрози з утворенням редуруючих цукрів [5,7]. Також іде розвиток мікроорганізмів, які споживають цукрозу і продукти її розкладу, підвищуючи кислотність, що в свою чергу прискорює розкладання цукрози [7,8]. Внаслідок описаних процесів погіршуються якість та товарний вигляд цукру.

Для розрахунку процесів тепловологопереносу, що протікають у масиві цукру-піску пропонується модель, що ґрунтується на новому потенціалі переносу вологи θ , шкала якого побудована на вологовмісті ідеального вологого матеріалу – вологого повітря [3]. Цей потенціал вимірюється за допомогою давачів потенціалу, а також підраховується за формулою:

$$\theta = 4,15 \times 10^3 \left(\frac{99325 \times 100}{\phi \cdot p_{HT}} \right)^{-1}, \quad (1)$$

де ϕ – відносна вологість повітря, %; p_{HT} – парціальний тиск пари для даної температури, Па.

За формулою (1) можна розрахувати потенціал переносу вологи для цукру, якщо у неї підставити відносну вологість міжкристального повітря. Воно перебуває у температурно-потенціальній рівновазі з цукром, яка однозначно визначена ізотермами сорбції. Цей потенціал також можна виміряти за допомогою давачів потенціалу.

Рівняння взаємопов'язаного тепломасопереносу, записані через густини потоків мають вигляд [3]:

$$\begin{aligned}
 c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} &= \frac{\partial}{\partial x}(q + q_m); \\
 q &= \lambda_e \frac{\partial T}{\partial x}; \\
 q_m &= \lambda_m T \frac{\delta_T}{c_m} \delta_D \frac{\partial \theta}{\partial x}; \\
 c_m \rho_0 \frac{\partial \theta}{\partial \tau} &= \frac{\partial}{\partial x}(j + j_T); \\
 j &= \lambda_m \frac{\partial \theta}{\partial x}; \\
 j_T &= \lambda_m \frac{\delta_T}{c_m} \frac{\partial T}{\partial \tau},
 \end{aligned} \tag{2}$$

де q — густина еквівалентного теплового потоку за рахунок істинної молекулярної теплопровідності та переносу енергії з термодифузійним потоком маси (ефект Соре - Ликова); q_m —густина теплового потоку за рахунок дифузійної теплопровідності (ефект Дюфо) та переносу енергії із дифузійним потоком маси; j — густина дифузійного потоку маси; j_T — густина термодифузійного потоку маси; $\lambda_e = \lambda + \lambda_m \frac{\delta_T}{c_m} h_v$ — еквівалентний коефіцієнт теплопровідності при одночасному переносі теплоти молекулярною та молярною (термодифузійною) теплопровідністю під дією ∇T , λ , λ_d - коефіцієнти відповідно істинної (за законом Фур'є) та дифузійної (за ефектом Дюфо) теплопровідності, λ_m — коефіцієнт ізотермічної масопровідності під дією $\nabla \theta$; a_m — коефіцієнт потенціалопровідності (дифузії вологи); ρ_0 - густина сухого скелета матеріалу, h_v -ентальпія вологи у цукрі (враховується волога, що перебуває у плівці розчину на поверхні кристалів цукру і волога у вигляді пари, що міститься у

міжкристальному повітрі); $c_m = \left(\frac{\mathcal{I}u}{\mathcal{I}q} \right)_T$ - ізобарно-ізотермічна вологоємність цукру;

$d_T = \left(\frac{\mathcal{I}u}{\mathcal{I}T} \right)_q$ - ізобарно-ізопотенціальний коефіцієнт термодифузії води за

ефектом Сорє - Ликова; $d = \frac{d_T}{c_m}$ - відносний коефіцієнт термодифузії;

$\delta_D = \left(\frac{\partial h_g}{\partial \theta} \right)_T$ - ізобарно-ізотермічний коефіцієнт дифузійної теплопровідності за

ефектом Дюфо.

Для розрахунку за методом кінцевих різниць масив цукру розбивається на шари з кроком $\Delta x = x_{n+1} - x_n$, а час - на відрізки $\Delta \tau = \tau_{k+1} - \tau_k$.

Система рівнянь у кінцевих різницях для явного триточкового шаблону має вигляд (значення T' та θ' стосуються момента часу $\tau + \Delta \tau$):

$$\begin{aligned}
 q_n &= \frac{T_n - T_{n+1}}{\Delta x} \lambda_e(T_n, \theta_n); \\
 q_{mn} &= \frac{\theta_n - \theta_{n+1}}{\Delta x} \lambda_m(T_n, \theta_n) T_n \frac{\delta_T(T_n, \theta_n)}{c_m(T_n, \theta_n)} \delta_D(T_n, \theta_n); \\
 T'_n &= T_n + \frac{\Delta \tau [(q_n + q_{mn}) - (q_{n+1} + q_{mn+1})]}{c(T_n, \theta_n) \rho(T_n, \theta_n)}; \\
 j_n &= \frac{\theta_n - \theta_{n+1}}{\Delta x} \lambda_m(T_n, \theta_n); \\
 j_{Tn} &= \frac{T_n - T_{n+1}}{\Delta x} \lambda_m(T_n, \theta_n) \frac{\delta_T(T_n, \theta_n)}{c_m(T_n, \theta_n)}; \\
 \theta'_n &= \theta_n + \frac{\Delta \tau [(j_n + j_{Tn}) - (j_{n+1} + j_{Tn+1})]}{c_m(T_n, \theta_n) \rho_0(T_n, \theta_n)}.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Коефіцієнти переносу c_m , δ_T , δ_D визначаються за допомогою чисельного диференціювання функцій $u = f(T, \theta)$ і $h_g = f(T, \theta)$. Після цього визначаються густини потоків теплоти та вологи, а потім значення T' та θ' .

За даними [3] стійкість розрахунку забезпечується за умов $(2Fo_q - 1) < 0$ та $(2Fo_j - 1) < 0$, де Fo_q - теплове число Фур'є, Fo_j - масообмінне число Фур'є. Виходячи з цих умов, вибираються Δx та Δt .

На базі (3) розроблено програму розрахунку тепловологопереносу у масиві цукру-піску під час зберігання. За допомогою програми з'являється можливість вести розрахунок, прогнозування та оптимізацію процесу зберігання цукру (форми та розміру штабелів, способів їх укладання, режимів вентиляції тощо).

Висновок: Запропоновано нову модель тепловологопереносу у штабелі цукру-піску, на базі якої з'являється можливість вести розрахунок, прогнозування та оптимізацію процесу зберігання цукру.

Література

- 1.ГОСТ 26907—86. Сахар. Условия длительного хранения.—М.—1986 .
- 2.Инструкция по эксплуатации силосных складов бестарного хранения сахара-песка.— Минпищепром СССР, Главсахар, ВНИИСП.— 1978.— 185с.
- 3.Пахомов В.М., Вдосконалення теорії та методики розрахунку тепломасопровідності вологих харчових структур.— У зб. Наукові праці УДУХТ, №1.— К.: 1993.— с. 94—105.
- 4.Bagster D.F., Cause, prevention and measurement of the caking of refined sugar — a review. / International Sugar Journal.— 1970.— №1 861—862.— pp.263—267, 298—302.

5. Заборсин А.Ф., Температурно-влажностные режимы хранения сахара-песка.— К.— Госплан СМ УССР, ГУСП Минпищепрома УССР.— 1966.
6. De Bruijin J. M., Marijnissen A.A.W. / Moisture content of sugar crystals and influence of storage conditions. // ISG.—1996.— №1171.—p. 378.
7. Беляев А.И. и др., Изменение микрофлоры сахара-песка при его хранении. / Сахарная промышленность.— 1985.— № 5.— с. 17—188.
8. Godshall M. A., Miranda X.A. / Changes in soft sugar on storage. // ISG.—1996.— №1174.— p. 559.