

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ В БЛОЧНІЙ ЗЕРНОСУШАРЦІ

Д.т.н., проф. Бурдо О. Г., к.т.н., доц. Безбах І. В, асп. Донкоглов В. І.
(Одеська національна академія харчових технологій)

*Розглянуто процес сушіння зерна в блочній зерносушарці. Наведено результати моделювання.
Process drying of grain in block grain dryer is considered. Results of modeling are presented.*

Ключові слова: термосифони, пшениця, моделювання

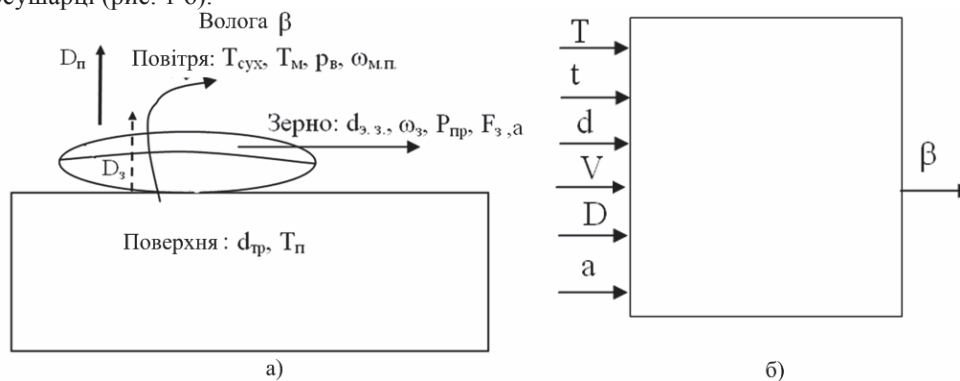
Число завдань, у яких потрібно оптимізувати параметри процесу, конструкції та ін., безупинно росте. Математичні моделі звичайно є основою для проведення процесу оптимізації, оскільки практично всі методи оптимізації є математичними (або засновані на певних математичних положеннях). Завдання оптимізації стали особливо необхідними в умовах, коли рано або пізно будь-яке технічне рішення проходить економічну перевірку. При розрахунку нового типорозміру сушильного апарата на основі інформації, отриманої на стадії науково-дослідних і дослідно-технологічних робіт, формуються вихідні дані, які входять у тип і продуктивність сушильної установки, властивості матеріалу, що висушується, (вологість, теплофізичні характеристики, температура нагрівання) і вимоги до якості готового продукту (вологість, структурні й морфологічні характеристики).

У шахтних сушарках повітря є тепло- вологоносієм. Його функція – нагріти зерно й забрати вологу. Відомі моделі для тепло- масообміну для шахтних сушарок орієнтовані саме на потік повітря, тому що його параметри впливають на процес сушіння [1]. Побудований також ряд моделей, що враховують властивості продукту, що висушується [2].

Відмінною рисою конструкції блочній зерносушарки є те, що нагрівання зерна, що рухається щільним гравітаційним шаром, здійснюється за рахунок контакту з нагрітою поверхнею конденсатора термосифона (ТС). Повітря видаляється із сушарки за допомогою вентилятора. У такому випадку повітря є дифузійним середовищем. На процес масовіддачі впливає швидкість, температура зерна, швидкість повітря. Потоки повітря й зерна впливають на процес практично рівною мірою.

Моделі гідромеханіки зернового шару, що рухається в блочній зерносушарці, процесів тепло- масообміну відсутні.

Складено параметричну схему для аналізу процесів тепло- масообміну при сушінні зернових в блочній зерносушарці (рис. 1 б).



а) схема процесу сушіння; б) параметрична схема процесу масовіддачі

Рис. 1 – Схема процесу сушіння в блочній зерносушарці

Потік зерна рухається усередині сушильної шахти зі швидкістю ω_z (рис. 1 а). Еквівалентний діаметр зернівки $d_{е.з.}$. Зерно, що рухається, омиває нагріті трубки конденсатора. Діаметр трубок $d_{тр.}$. Площа поверхні конденсатора F . Температура поверхні конденсатора $T_{п.}$. Зернівка нагрівається за рахунок контакту з нагрітою поверхнею модуля. Тиск пари над поверхнею матеріалу $P_{пр.}$. Площа зерна F_z . Зернівку омиває потік повітря. Коефіцієнт дифузії водяної пари в повітрі $D_{п.}$; швидкість повітря в міжзерновому просторі $\omega_{мп.}$; температура повітря $T_{сух.}$; температура мокрого термометра $T_{м.}$; парціальний тиск насиченої пари в повітрі p_v . Інтенсивність процесу масовіддачі прямо пов'язана з температурою

нагрівання зерна. Ступінь нагрівання зерна визначається його теплофізичними властивостями – коефіцієнтом температуропровідності (α), середньою вологістю (u_{cp}), швидкістю руху зернового потоку.

Залежність β від режимних факторів отримана за допомогою методу аналізу розмірностей. В загальному вигляді рівняння в числах подібності – залежність числа Нусельта дифузійного (Nu_d) від чисел Пекле теплового (Pe_T), симплекса температур (t/T); (a/D) – симплекса, що відповідає за тепло-фізичні властивості матеріалу й повітря:

$$Nu_d = f \left[Pe_T, \left(\frac{t}{T} \right), \left(\frac{a}{D} \right) \right] \quad (1)$$

Аналогічно отримано вид рівняння в числах подібності для розрахунку питомих енерговитрат на процес сушіння:

$$\frac{j}{j_0} = A \cdot \left(Re_B \right)^k \cdot \left(\frac{T_{сух}}{T_{\Pi}} \right)^n \quad (2)$$

Де j — енерговитрати на процес сушіння, МДж/кг; $j_0 = 2,5$ МДж/кг — базові енерговитрати на процес; Re_B — число Рейнольдса для повітря, що рухається в міжзерновому просторі; A, k, n - константи.

Та вид рівняння для розрахунку ступеня змішування:

$$D = A \cdot Fr^k \quad (3)$$

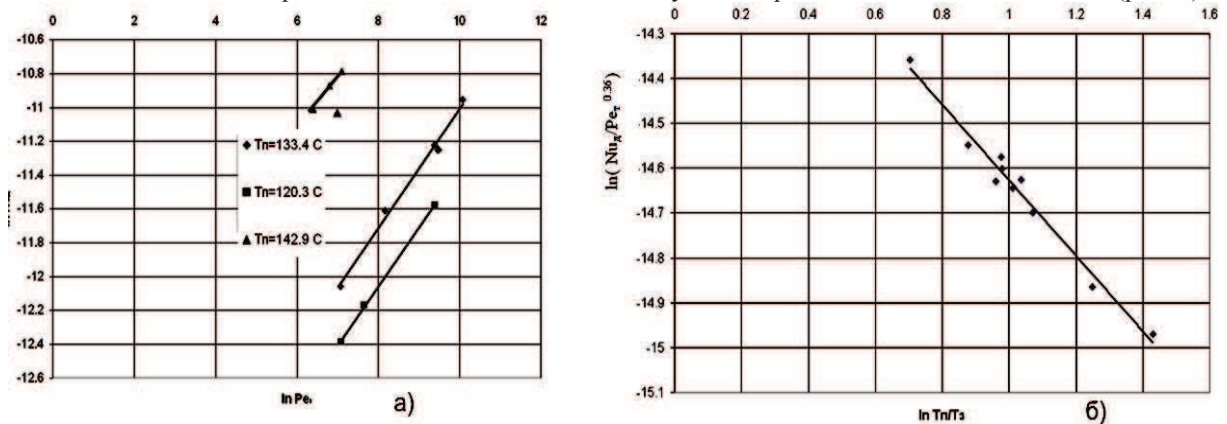
Де D – ступінь змішування; Fr — число Фруда; A, k — константи.

Для розрахунку тривалості сушіння використано структуру рівняння у числах подібності, що запропонована О. В. Ликовим:

$$\frac{U_n}{U_k} = A \cdot Fo^{k_1} \cdot Bi^{k_2} \quad (4)$$

де u_n/u_k — безрозмірна вологість; Fo — число Фур'є дифузійне; Bi — число Біо дифузійне; A, k_1, k_2 — константи.

Узагальнення експериментальних даних по кінетиці сушіння проведено в числах подібності (рис. 2).



а) залежність $\ln Nu_d$ від $\ln Pe_m$ при різних температурах поверхні T_C ; б) залежність $\ln(Nu_d / Pe_m^{0.36})$ від $\ln(T_n / T_3)$ при різних температурах поверхні T_C

Рис. 2 – Узагальнення експериментальних даних по кінетиці сушіння в блочній зерносушарці

Вихідними даними для обробки є експериментальні дані, отримані при сушінні пшениці в блочній зерносушарці. Обробку дослідних даних представлено в логарифмічних координатах.

В результаті послідовно отримано вплив кожного комплексу на процес (рис. 2 а, б). Отримано коефіцієнти в рівнянні в числах подібності для розрахунку числа Нусельта дифузійного.

Розбіжність між розрахунковими та експериментальними даними в межах 15 % (рис. 3).

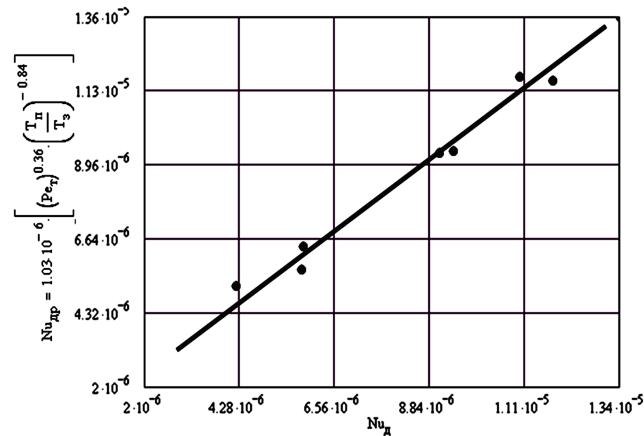


Рис. 3 – Залежність між розрахунковими числами Нусельта й експериментальними $Nu_{d,p}-f(Nu_d)$

Аналогічно отримано показники степені в рівнянні для визначання безрозмірної вологості:

$$\left(\frac{u_H}{u_K} \right)^p = 4.632 (Fo_D)^{0.16} \cdot (Bi)^{0.13} \quad (5)$$

Розбіжність між розрахунковими та експериментальними даними в межах 14 %.

Узагальнення даних по питомим енерговитратам проведено із застосуванням програми MathCad. Отримано рівняння виду:

$$\frac{j}{j_0} = \left[73.5 (Re_B)^{-0.43} \cdot \left(\frac{T_{сух}}{T_p} \right)^{0.85} \right] \quad (6)$$

Розбіжність між розрахунковими та експериментальними даними в межах 14 %.

Алгоритм розрахунку сушильної установки представлено як сукупність окремих блоків. Результатом розрахунку є геометричні параметри сушарки, площа поверхні ТС.

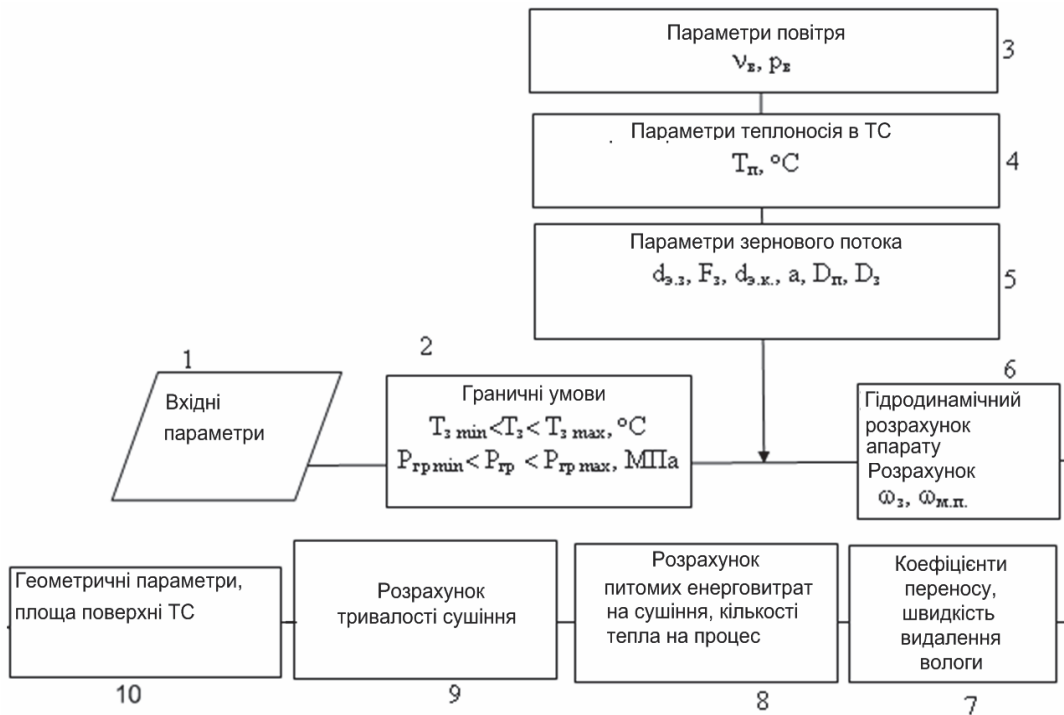


Рис. 4 – Алгоритм розрахунку блочної сушильної установки.

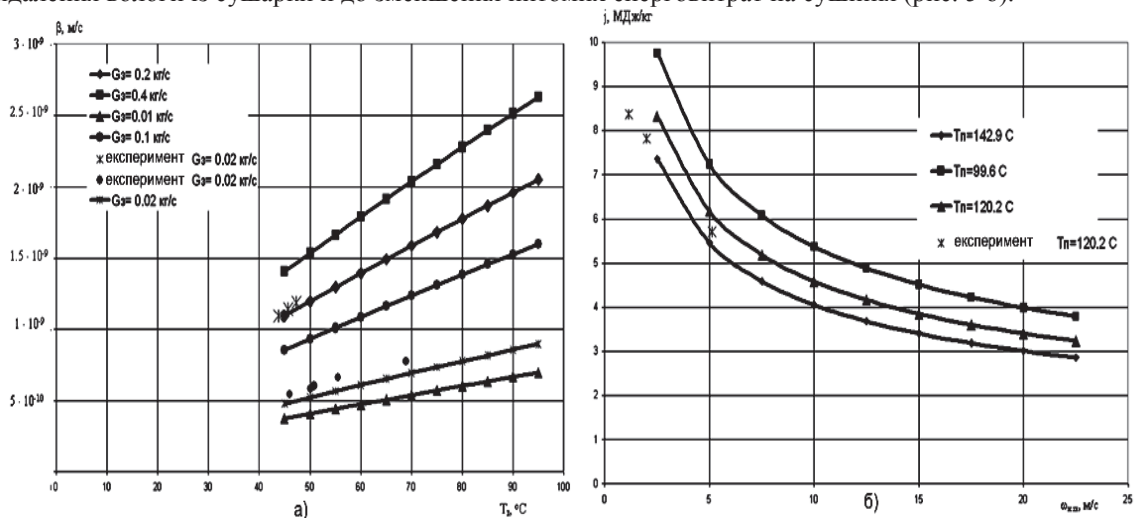
Для визначення властивостей води, тиску водяної пари над продуктом використані апроксимаційні рівняння. Діапазон комп'ютерного моделювання наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Діапазон комп'ютерного моделювання

Позначення	Розмірність	Найменування	Значення
G_3	кг/с	Витрати зерна в сушарці	$0,01 \div 0,5$
T_3	$^{\circ}\text{C}$	Температура зернового потоку	$45 \div 90$
u	%	Вологість зерна	$13 \div 20$
$P_{\text{гр}}$	МПа	Тиск у модулі ТС	$0,1 \div 0,4$
$\omega_{\text{в}}$	м/с	Швидкість повітря на виході із сушарки	$2,5 \div 22,5$

В ході комп'ютерного моделювання діапазон температур зернового потоку, тиску у модулі ТС, швидкостей повітря виходить за межі експериментальних значень. Визначено вплив витрат зернового потоку, температури зернового потоку на процес масовіддачі. Температура зернового потоку варіювалася з інтервалом 5°C .

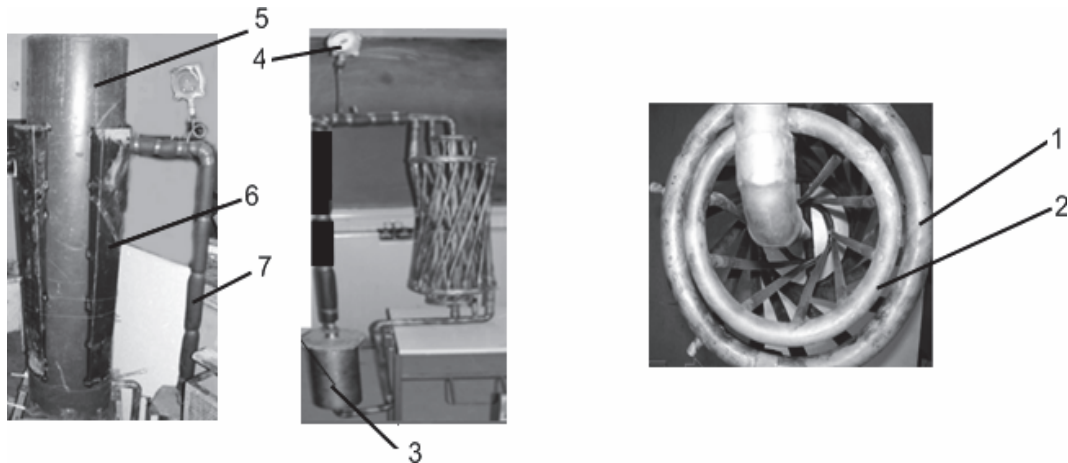
Діапазон температур зернового потоку перевищує гранично припустимі температури для зерна. Для порівняння на графік нанесені значення коефіцієнтів масовіддачі, отримані для різних витрат зернового потоку в ході експериментів (рис. 5 а). Збільшення швидкості повітря приводить до інтенсифікації процесу видалення вологи із сушарки й до зменшення питомих енерговитрат на сушіння (рис. 5 б).



а) вплив температури зернового потоку на коефіцієнт масовіддачі; б) залежність питомих енерговитрат від швидкості повітря в міжзерновому просторі

Рис. 5 – Результати комп'ютерного моделювання

За результатами комп'ютерного моделювання розроблений експериментальний зразок сушильної установки з повною рециркуляцією теплоносія (рис. 6). Основними його елементами є: шахта, повітропроводи, конденсатор, парогенератор, паропроводу. Теплообмінні трубки виконані похилими. Це сприяє перемішуванню зернового потоку й повному контакту теплопередаючої поверхні із продуктом. Кут нахилу труб однаковий, а в сусідніх пучках закручений у протилежних напрямках, що є додатковим чинником перемішування потоку. Щоб уникнути заклинювання зернівок, колектори сусідніх пучків мають різну висоту. Самі пучки підключені паралельно, вихід конденсату здійснюється в загальний колектор рідини.



1 – зовнішній контур модуля; 2 – внутрішній контур модуля; 3 – випарник; 4 – манометр; 5 – сушильна шахта; 6 – повітропроводи 7 – паропровід

Рис. 6 – Експериментальний зразок сушильної установки з повною рециркуляцією теплоносія:

По наведеному алгоритму розроблено проект модернізації зерносушарки ДСП-12 (рис. 6) на запропоновану схему роботи. У блочній зерносушарці такої ж продуктивності нижче енерговитрати з 5 до 3,54 МДж/кг і габарити (табл. 2).

Таблиця 2 – Технічні характеристики блочної зерносушарки з повною рециркуляцією теплоносія

Показники	Сушарки	
	ДСП-12	Блочна сушарка
Продуктивність (при зниженні вологості з 21 до 15%, т/год)	12	12
Внутрішні розміри шахти, м:		
Довжина	3,25	-
Ширина (діаметр)	1,0	1,5
Висота	12,6	11,2
Кількість зерна в сушильній камері (пшениця з об'ємною вагою 750 кг/м ³), т.	11,9	14,8
Кількість зерна в охолоджувальній камері	6,4	
Час перебування зерна, хв:		
У сушильній камері	59	73,9
В охолоджувальній камері	32	
Параметри модуля конденсатора ТС		
Площа поверхні, м ²	-	47
Діаметр патрубка ТС d _{тр} , м	-	0,05
Енерговитрати, МДж/кг уд. вл.		
	5	3.54

Проект блочної зерносушарки з повною рециркуляцією теплоносія показав, що по порівнянні з установкою ДСП-12 питомі енерговитрати знижуються на 30 %, тривалість сушіння скорочується на 10% при практично однакових габаритних параметрах установки.

Література

1. О. Г. Бурдо, О. В. Зиков, Донкоглов В. І. Невтішний виходить моніторинг енергозатрат на зернопереробних підприємствах України «Зерно і хліб». – Випуск 3 – 2006. – С.46–47.
2. О. Г. Бурдо, О. В. Воскресенська, Донкоглов В. І. Тенденції розвитку зерносушильної техніки «Зернові продукти і комбікорми». №2, 2006 р., С.48–53.