

УДК 631.364:621.311.243
№ держреєстрації 0121U110251
Інв. №: 01-2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного


Юридична адреса:
72310, м. Мелітополь, пр. Богдана Хмельницького, 18; тел. (0619) 42 06 18
Фактична адреса:
69600, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 66; тел. +38 099 6148302

ЗАТВЕРДЖУЮ
Ректор Таврійського державного
агротехнологічного університету
імені Дмитра Моторного,
докт. техн. наук, професор
_____ Сергій КЮРЧЕВ
«__» _____ 2023 р.

ЗВІТ
про науково-дослідну роботу
(проміжний)

**Програма: Технічне забезпечення інноваційних технологій
в агропромисловому комплексі**

Завідувач лабораторії,
канд. техн. наук


_____ Олександр СКЛЯР
«__» _____ 2023 р.

2023

Результати роботи розглянуто НТР НДІ МЗПУ,
протокол № __ від «__» грудня 2023 р.

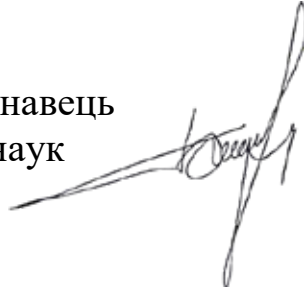
СПИСОК АВТОРІВ

Керівник теми і
відповідальний виконавець -
кандидат технічних наук



Олександр СКЛЯР
(вступ, розділи 1, 2, 3, 4, 5,
висновки)

Відповідальний виконавець
кандидат технічних наук



Борис БОЛТЯНСЬКИЙ
(розділи 2, 3, 4, 5)

кандидат технічних наук



Радміла СКЛЯР
(участь у розділах 2, 3, 4)

провідний інженер



Сергій ДЕРЕЗА
(участь у розділі 4)

інженер



Сергій ГРИГОРЕНКО
(участь у розділі 4)

інженер



Артем КОМАР
(участь у розділі 4)

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 25 с., 3 рис., 1 табл., 23 джерела.

Об'єкт досліджень: процес сушіння сільськогосподарської продукції та обміну теплом і масою між теплоносієм і висушуваним матеріалом у геліосушарці.

Мета роботи: розроблення математичної моделі та дослідження тепломасообмінних характеристик під час сушіння сільськогосподарської продукції з урахуванням руху зони випаровування для нестационарного режиму сушіння у геліосушарці.

Методи досліджень.

Теоретичні дослідження проводили із застосуванням теорії подібності. Експериментальні дослідження здійснювали згідно з методикою проведення повного факторного експерименту за схемою 2^2 (два фактори на двох рівнях). Оброблення дослідних даних здійснювали на ЕОМ із застосуванням математичної статистики та регресійного аналізу.

В результаті проведених досліджень:

- розроблено математичні моделі процесу сушіння сільськогосподарських продуктів у геліосушарці, які дозволяють розрахувати показник поглинання вологи у ситуаціях, коли відбувається дифузний перенос вологи всередині матеріалу, і також регулювати глибину проникнення теплового потоку в поверхневий шар, де відбуваються фазові перетворення;
- визначено збіжність інтенсивності сушіння, використовуючи аналіз відносної похибки.

СОНЯЧНА ЕНЕРГІЯ, ГЕЛІОСУШАРКА, ТЕМПЕРАТУРА, ВОЛОГІСТЬ, ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСЕННЯ, ІНТЕНСИФІКАЦІЯ, КОНВЕКТИВНЕ СУШІННЯ, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

ЗМІСТ

ВСТУП.	5
1 ПРОГРАМА ДОСЛІДЖЕНЬ.	6
2 ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ.	6
3 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ.	17
4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.	18
5 УПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ.	20
ВИСНОВКИ.	22
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.	23

ВСТУП

Одним із елементів харчової безпеки країни є формування запасів сухих продуктів харчування, наприклад, сухофруктів та сушених овочів, які входять до щоденного раціону супових та борщових наборів та інших напівфабрикатів, що характеризуються високою поживністю та стійкістю до псування. Їх виготовлення здійснюється з використанням сушарок різного типу з традиційним джерелом тепла у вигляді електричної енергії, або ж тепла продуктів згоряння палива. В той же час, використання сонячних повітряних колекторів або теплових насосів, які спільно працюють із сушарками, може вирішити питання незалежності від централізованого енергозабезпечення, зниження рівня споживання енергоресурсів тощо.

Значна частина обсягів сушіння сільськогосподарської продукції припадає на геліосушильні камери періодичної дії (ГКПД). Умови поліпшення роботи ГКПД і підвищення якості сушіння – автоматизація цього процесу. Проте, для інтенсифікації процесу сушіння – ведення його у режимах, близьких до оптимальних, наявні системи керування малоефективні. Вирішити це завдання можна, застосовуючи системи керування з урахуванням стану матеріалу із використанням мікропроцесорних засобів і ЕОМ. Розробка економічно ефективних систем керування сушінням фруктів на базі нових технічних засобів автоматизації і обчислювальної техніки вимагає глибокого вивчення сушильних камер, як об'єктів керування і побудови адекватних математичних моделей. Розробки науково обґрунтованих математичних моделей об'єктів керування є тим фундаментом, на якому зводиться весь комплекс «Алгоритм – Програма – ЕОМ – Об'єкт».

Практика проектування і експлуатації систем автоматичного регулювання процесу сушіння фруктів свідчать, що дослідження ГКПД як об'єктів керування та їх математичне обґрунтування виконувались на недостатньо високому рівні і лише для окремих каналів регулювання, що неприпустимо і не відповідає вимогам, які ставляться до математичних моделей для цифрових систем оптимального керування. Цим зумовлені дослідження, спрямовані на розробку математичної моделі ГКПД.

Схеми побудови математичних моделей, придатних для кожного конкретного випадку не існує, оскільки різні технологічні процеси сушіння (сушильні камери) мають специфічні особливості.

Перевага моделювання із використанням фізичних законів сушіння полягає у тому, що воно дає змогу зрозуміти фізичні характеристики процесу; параметри і змінні у цьому випадку мають зрозумілий фізичний зміст. Навіть у випадку розв'язання задачі ідентифікації, як процесу експериментального визначення математичних моделей на основі знання вхідних і вихідних сигналів попередньо потрібно мати параметричну фізичну модель.

Немає спільної думки і щодо апроксимації сушарок як поєднання типових елементів системи автоматичного регулювання. Під час експериментального вивчення сушильної камери, як об'єкта регулювання дуже важко дослідити вплив на динамічні показники її конструктивних технологічних параметрів і властивостей продукту.

1 ПРОГРАМА ДОСЛІДЖЕНЬ

Математичне моделювання процесу сушіння сільськогосподарської продукції у геліосушарці для визначення оптимальних технологічних режимів на стадії проектування сушильних агрегатів.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ

Накопичені експериментальні дані по визначенню динамічних характеристик ГКПД сумнівні щодо їхнього використання для синтезу високоякісних оптимальних систем керування. Так, у літературних джерелах для експериментального визначення динамічних характеристик ГКПД різні автори наводять різні кількісні оцінки тих самих параметрів, причому, конкретні значення їх іноді сумнівні. Наприклад, для коефіцієнта підсилення по каналу регулювання: температура пари у колекторі – температура агенту сушіння по сухому термометру ($t_n \rightarrow t_c$), – пропонуються значення у діапазоні від 0,22 до 0,46 ($^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$), тобто для одержання в середині камери температури 60°C при середньому коефіцієнті підсилення 0,3 температура у колекторі повинна становити 20°C або тиск насиченої пари понад $15 \text{ кгс}/\text{см}^2$, що не відповідає технічним характеристикам ГКПД.

Дослідження не дали точних значень динамічних характеристик самих сушильних камер, тому що у всіх випадках був значним вплив динаміки використовуваних для вимірювання датчиків. На точність одержаних даних впливала наявність ненульових початкових умов, оскільки у процесі сушіння фруктів при визначенні кривих розгону неможливо домогтися стабілізації решти параметрів.

Суперечливі експериментальні дані щодо динаміки каналів: витрати пари на зволожувальні труби – температура агенту сушіння за «сухим» термометром ($G_n \rightarrow t_c$) і температура пари у колекторі – температура агенту сушіння за змоченим термометром ($t_n \rightarrow t_m$). Дослідження перехідних функцій за цими перехресними каналами потрібне для визначення спільного ступеня зв'язку між двома регульованими величинами t_c і t_m .

Таким чином, аналіз літературних джерел з питань математичного моделювання геліосушильних камер дає підстави вважати потрібною аналітичну розробку математичної моделі ГКПД, тому, що одержана експериментально модель виявилась неефективною для синтезу цифрових систем керування.

Головні вимоги, що ставляться до математичної моделі при її розробці – відбиття тих властивостей функціонування ГКПД, і відомості про які потрібні для розробки алгоритмів керування, хоча бажано застосовувати цю модель і для визначення оптимальних технологічних режимів на стадії проектування сушильних агрегатів.

У агропромисловому комплексі геліотермічні установки знайшли широке застосування. Наприклад, для сушіння рослинної сировини, зокрема фруктів, активно використовують сонячну енергію для потреб сушильного господарства. Для будь-яких кліматичних зон України можна повноцінно застосовувати такий вид зневоднення матеріалу. Зокрема, у Львівському національному університеті природокористування в співпраці з Таврійським державним агротехнологічним університетом імені Дмитра Моторного була розроблена геліосушарка з тепловим акумулятором та плоским дзеркальним концентратором, що є періодичною системою використання сонячної енергії. Функціонально-параметрична схема геліосушарки наведена на рисунку 1.

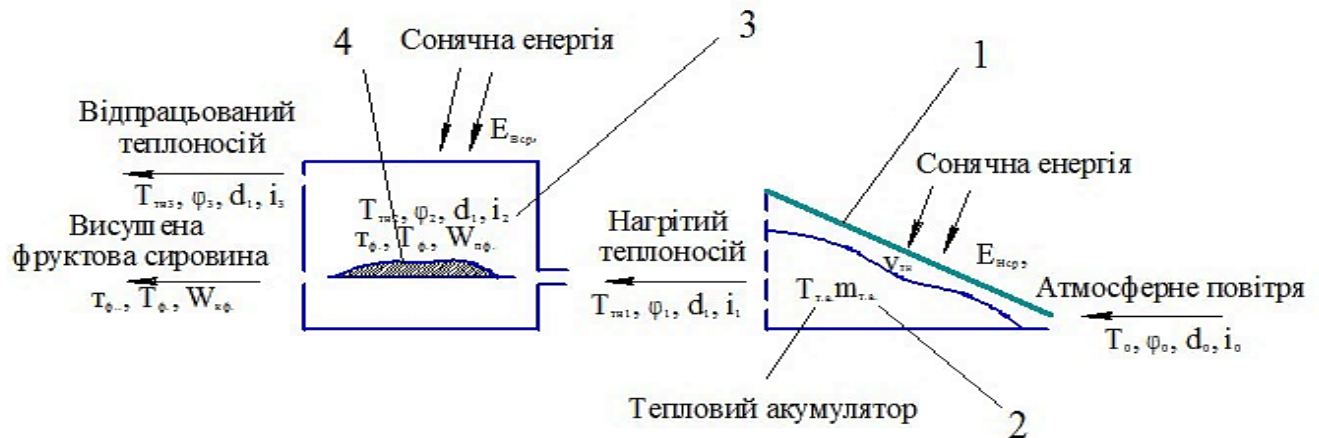


Рис.1. Функціонально-параметрична схема геліосушарки:

- 1 – повітряний колектор; 2 – тепловий акумулятор; 3 – сушильна камера;
4 – фруктова сировина

Аналітичний спосіб розробки технології сушіння та сушильної установки на основі математичної моделі, який ґрунтується на фізичних законах процесу сушіння, дає змогу вивчати ГКПД в цілому і виявляючи нові залежності, властивості і внутрішні зв'язки, одержувати кількісну оцінку ступеня впливу збурюючих і регулювальних дій, а також визначати коефіцієнти математичної моделі із конструктивно-технологічних характеристик камери.

Розроблена за таким способом математична модель хоча й має пізнавальну цінність, але нечутлива до впливу випадкових неконтрольованих факторів. Одержані теоретичні залежності не можуть враховувати зміни конструктивних і технологічних характеристик через зношеність і старіння обладнання, а також неправильну експлуатацію. Все ж таки ця модель, доповнена статистичними характеристиками випадкових збурюючих впливів і шумів вимірювальної апаратури, призначається для використання у структурі системи керування, тому що, застосовуючи принцип оптимальної фільтрації і ґрунтуючись на визначених вихідних параметрах і розробленій моделі, можна оцінити вектор стану ГКПД, який використовується для розробки керуючого впливу.

Повітряні колекторні ГКПД – технологічні об'єкти, у яких висушують матеріали у середовищі повітря (вологого повітря) із підведенням теплоти і видаленням вологи комп'ютерним способом. Конвективне сушіння фруктів – складним нестационарний процес теплообміну. З одного боку воно характеризується тепло- і вологопровідністю фруктів, тобто внутрішнім тепло- і вологообміном у висушуваній сировині і з другого – тепловіддачею від агенту сушіння до фруктів і вологовіддачею від фруктів до агенту сушіння, або зовнішнім тепло- і вологообміном. При цьому спостерігається нерівномірність температурних і вологісних полів за об'ємом сушильних камер. Зокрема ґрунтуючись на початковій формалізації апріорних даних про сушильну камеру, складено узагальнену структурну схему (рис 1).

На ній ГКПД апроксимована еквівалентною моделлю, складеною із декількох взаємопов'язаних місткостей із зосередженими параметрами.

Вихідні параметри моделі:

- t_c – температура сушильного агенту за сухим термометром, °С;
- X – вологовміст сушильного агенту, кг/кг;
- U – вологовміст фруктів, кг/кг;
- t_ϕ – температура фруктів, °С.

Проміжні параметри:

- t_k – температура колектору, °С;
- t_{oi} – температура i -го огородження, °С.

Вхідні параметри:

- t_n – температура пари у колекторі, °С;
- G_n – кількість пари, яка надходить через зволожувальні труби, кг/с;
- v – швидкість циркуляції сушильного агента у камері, м/с;
- L_0, L_1 – витрати повітря, яке надходить до камери і виноситься з неї, кг/с;

Збурюючі фактори:

- $t_{нов}$ – температура свіжого повітря, °С;
- t_{zi} – температура зовнішнього середовища i -го огородження, °С.

Теплоємність із боку подавання теплоти – теплоємність колектору, а з боку споживання теплоти – агенту сушіння, фруктів, огорожень. Окремо виділена ємність агенту сушіння, яка характеризується матеріальним балансом вологи в ньому. Враховуючи закон зберігання енергії, можна перехідний процес для теплоємності колектору описати рівнянням:

$$d_c a_1 F_{\text{вн}} (t_n - t_k) - C_3 a_{3\phi} F_{\text{pc}} (t_n - t_k) = C_k m_k \frac{dt_k}{dt}, \quad (1)$$

де δ_c – коефіцієнт теплових втрат колектору (наприклад, втрати теплопровідності через підвіски колектору, тощо);

a_1 – середнє значення коефіцієнта теплопередачі від конденсуючої пари до внутрішньої поверхні колектору, Вт/(м²·°С);

$F_{\text{вн}}$ – площа внутрішньої поверхні колектору, м²;

C_3 – коефіцієнт стану тепловіддавальної поверхні колектору;

α_{36} – зведений коефіцієнт тепловіддачі ребристої поверхні колектору, Вт/(м²·°С);

F_{pc} – площа повної зовнішньої поверхні колектору, м²;

C_k – питома теплоємність металу колектору, Дж/(кг·°С);

m_k – маса колектору, кг; τ – час, с.

Коефіцієнт тепловіддачі α_1 рекомендується визначати за критеріальним виразом Д. А. Лабунцева:

$$Re_n = 0,95 Z_n^{0,78} e_t, \quad (2)$$

що одержаний з відомого виразу Нуссельта для визначення коефіцієнта тепловіддачі за умов плівкової конденсації практично нерухомої чистої пари. Якщо подати критерії Re_n (2) через величини, які входять до нього, то одержимо вираз для розрахунку коефіцієнта теплопередачі від пари, яка конденсується, до внутрішньої поверхні колектора:

$$a_1 = 0,95 \frac{g^{0,26} / \nu_{p,n}^{0,78} r_p^{0,22} r_p^{0,22} e_t}{\nu_{p,n}^{0,32} h^{0,22} (t_n - t_k)^{0,22}}, \quad (3)$$

де g – прискорення сили тяжіння, м/с²;

$\lambda_{p,n}$ – коефіцієнт теплопровідності конденсату із температурою насичення, Вт/(м·°С);

$\nu_{p,n}$ – кінематична в'язкість конденсату із температурою насичення, м²/с;

r – прихована теплота пароутворення, Дж/кг;

ρ_p – щільність конденсату, кг/м³;

h – висота колектору, м;

ε_t – поправка, яка враховує залежність фізичних параметрів конденсату від температури.

Зведений коефіцієнт α_{36} тепловіддачі ребристої поверхні колектору пропонується визначати за методикою, наведеною М.Ю. Лур'є. Цей коефіцієнт – функція швидкості агента сушіння і його можна подати у такому вигляді:

$$a_{36} = K v^m, \quad (4)$$

де K і m – визначають із загального виразу для α_{36} , що одержують за наведеною методикою.

Тоді вираз (1) динаміки колектору можна записати у такому вигляді:

$$d a_1 F_{ен} (t_n - t_k) - C_3 K v^m F_{pc} (t_n - t_k) = C_k m_k \frac{dt_k}{dt}, \quad (5)$$

що дозволить виявити вплив швидкості агента сушіння на процес теплообміну між колектором і агентом сушіння.

Для складання диференційованого рівняння теплового балансу ємності агенту сушіння припускають, що через інтенсивну рівномірну циркуляцію сушильного агенту його температура і вологовміст однакові за простором зони сушіння, де підтримуються і контролюються їх задані властивості. У такому випадку, виходячи із структурної схеми (рис. 1), рівняння динаміки набуває вигляду:

$$C_3 a_{3z} F_{pc} (t_k - t_c) + G_n i_n + L_0 (C_{нов} + C_n X_{нов}) t_{нов} B r_0 - C_2 a_{dp} F_{dp} (t_c - t_\phi) - C_2 \overset{n}{\underset{i=1}{\mathbf{a}}} C a_{oz.i} F_{oz.i} (t_c - t_{oz.i}) - C_2 L_1 (C_{нов} + C_n X) t_c = (V_{a.c} \rho_{a.c} C_{a.c} + m_M C_M) \frac{dt_c}{dt}, \quad (6)$$

де i_n – ентальпія 1 кг пари, Дж/кг; $C_{нов}$;

C_n – питома ізобарна теплоємність сухого повітря і водяної пари, Дж/(кг·°C);

$X_{нов}$ – вологовміст свіжого повітря, кг/кг;

r_0 – прихована теплота пароутворення, Дж/кг;

C_2 – коефіцієнт неврахованих витрат теплоти, які покриваються колектором;

α_{dp} – коефіцієнт тепловіддачі від агенту сушіння до фруктів, Вт/(м²·°C);

F_{dp} – площа поверхні теплообміну фруктів, м²;

C – коефіцієнт, який враховує умови роботи сушильних камер;

n – кількість огорожень;

$\alpha_{oz.i}$ – коефіцієнт теплообміну агента сушіння з i -м огороженням, Вт/(м²·°C);

$F_{oz.i}$ – площа внутрішньої поверхні i -го огороження, м²;

$V_{a.c}$ – об'єм агенту сушіння, м³;

$\rho_{a.c}$ – щільність агенту сушіння, кг/м³;

$C_{a.c}$ – питома ізобарна теплоємність агенту сушіння, Дж/(кг·°C);

m_M – маса металу у камері, кг;

C_M – питома теплоємність металу у камері, Дж/(кг·°C).

У правій частині (6) $m_M C_M (dt_c/dt)$ характеризує приріст кількості теплоти металу у сушарці (екранів, повітроводів, треків), який з метою спрощення загального математичного опису сушарки віднесений до ємності агенту сушіння. Це спрощення зроблено на тій підставі, що наведений матеріал сушарки практично повністю знаходиться у середовищі агенту сушіння, його теплообмін здійснюється головним чином з агентом сушіння і його температура через відносно значну теплопровідність швидко досягає значень температури агенту сушіння.

Вираз $V_{a.c} (dt_c/dt)$ характеризує зміни кількості теплоти $dQ_{a.c}$ агенту сушіння за нескінченно малий проміжок часу dt :

$$r_{a.c} = \frac{0,622P(1+X)}{R_{нов}(273+t_c)(0,622+X)},$$

де P – барометричний тиск, Па; $R_{нов}$ – газова стала повітря, Дж/(кг·°C).

$$C_{a.c} = \frac{C_{нов} + C_n X}{1 + X}.$$

Беручи до уваги, що процес змінювання температури агента сушіння відбувається одночасно із змінюванням його вологовмісту X , у загальному вигляді:

$$\frac{dQ_{a.c}}{dt} = \frac{\partial Q_{a.c}}{\partial t_c} \times \frac{dt_c}{dt} + \frac{\partial Q_{a.c}}{\partial X} \times \frac{dX}{dt}.$$

На підставі виразів для визначення $\rho_{a.c}$ і $C_{a.c}$:

$$\frac{dQ_{a.c}}{dt} = \frac{169,8PV_{a.c}(C_{нов} + C_n X)}{R_{нов}(0,622 + X)(273 + t_c)^2} \times \frac{dt_c}{dt} + \frac{0,622PV_{a.c}(0,622 - C_{нов})}{R_{нов}(273 + t_c)(0,622 + X)^2} \times \frac{dX}{dt}. \quad (7)$$

Числовий аналіз свідчить, що другий член правої частини (7) менший від першого понад один порядок, значення першого члена не на багато відрізняється від значень виразу:

$$V_{a.c} \rho_{a.c} C_{a.c} (dt_c/dt).$$

Через це праву частину рівняння динаміки ємності агента сушіння записують за рівнянням (6).

У виразі (6) приймають, що значення витрат повітря L_0 і L_1 різні, хоча у технологічних розрахунках $L_0=L_1$. У даному разі враховують можливість регулювання сухого повітря, яке надходить L_0 і яке виходить L_1 із сушарок за допомогою дроселюючих органів (шиберів). $X_{нов}$ із виразу (6) у загальному випадку можна вважати зовнішнім збурюючим фактором.

Інтенсивність випаровування вологи із фруктів:

$$J = - G_0 \frac{dU}{dt}, \quad (8)$$

де G_0 – маса абсолютно сухої фруктів, кг;

U – середнє інтегральне значення вологовмісту фруктів; кг/кг.

Коефіцієнт тепловіддачі від агенту сушіння фруктів:

$$a_{op} = \frac{l}{l} 0,072 \frac{\text{æ}l \ddot{\text{o}}}{\text{en} \text{ø}}^{0,8}, \quad (9)$$

де l – характерний розмір матеріалів у напрямі руху агенту сушіння, м;
 λ – коефіцієнт теплопровідності агенту сушіння, Вт/(м·°С);
 ν – кінематична в'язкість агенту сушіння, м²/с.

Оскільки коефіцієнт $\alpha_{др}$ залежить від швидкості агенту сушіння, то при потребі у виразі (6) можна простежити вплив останньої на теплообмін між деревиною і агентом сушіння.

Із урахуванням припущень, зроблених при виведенні рівняння динаміки теплоємності агента сушіння, а також того, що процес змішування водяної пари, яка надходить до камери, з агентом сушіння відбувається миттєво, рівняння матеріального балансу для вологи у ємності агента сушіння (див. рис. 1) набуває вигляду:

$$G_n + L_0 X_{нов} + B - L_1 b_n X = \frac{dM}{dt},$$

де β – коефіцієнт неорганізованого повітрообміну;

$$M = \frac{V_{a.c} r_{a.c} X}{1 + X} \quad \text{– кількість вологи у сушильному агенті, кг.}$$

Хоча у загальному випадку $r_{a.c} = f(X, t_c)$, числовий аналіз рівняння динаміки свідчить, що для конкретного ступеня технологічного режиму можна вважати $r_{a.c} = const$. У такому разі рівняння матеріального балансу для вологи в агенті сушіння:

$$G_n + L_0 X_{нов} + B - L_1 b_n X = \frac{V_{a.c} r_{a.c}}{(1 + X)^2} \times \frac{dX}{dt}. \quad (10)$$

У період сталої швидкості сушіння теплота, яка надійшла до фруктів, витрачається на випаровування вологи. Припускаємо, що середня температура фруктів t_ϕ дорівнює температурі її поверхні, а в період спаду швидкості сушіння мало відрізняється від неї. Тому на підставі закону зберігання енергії можна записати рівняння балансу теплоти для ємності фруктів (рівняння кінетики), яке вірне при $U > U_{кр}$, у такому вигляді:

$$a_\phi (t_g - t_\phi) = k_3 r_0 r_v \frac{dU}{dt}, \quad (11)$$

де $U_{кр}$ – вологовміст матеріалу в момент закінчення періоду сталої швидкості і на початку періоду спаду швидкості сушіння;

ρ_0 – умовна щільність фруктів, кг/м³;

R_v – відношення об'єму абсолютно сухої фруктів у шарі до поверхні теплообміну вологої фруктів, м;
 k_3 – коефіцієнт уповільнення сушіння у шарі.

У період спаду швидкості сушіння відповідно до закону зберігання енергії кількість теплоти, яка надходить до фруктів, дорівнює витраченій на її нагрівання і випаровування вологи.

За таких умов тепловий баланс для ємності фруктів знаходять за рівнянням – основним рівнянням кінетики сушіння, яке вірне при $U > U_{кр}$:

$$a_{\phi} (t_s - t_{\phi}) = \frac{\alpha}{\epsilon} r_0 \frac{dU}{dt} + C_{\phi} \frac{dt_{\phi}}{dt} \frac{\ddot{\phi}}{\phi} r_0 k_3 R_v, \quad (12)$$

де C_{ϕ} – питома теплоємність вологої фруктів, Дж/(кг·°C).

Вирази (11) і (12) визначають взаємозв'язок середніх інтегральних значень вологовмісту U і температури t_{ϕ} фруктів.

Для теплоємності огорожень камери (див. рис. 1), що складаються із стін, підлоги, стельового покриття і дверей (на підставі закону зберігання енергії і припущення щодо рівномірного розподілу температури $t_{oz.i}$ за об'ємом кожного огороження), вираз перехідного процесу:

$$a_{oz.i} (t_c - t_{oz.i}) - a_{z,i} (t_{oz.i} - t_n) = C_{oz,i} r_{oz,i} \delta_i \frac{dt_{oz,i}}{dt}, \quad (13)$$

де $a_{z,i}$ – середнє значення коефіцієнта тепловіддачі від зовнішньої поверхні i -го огороження до зовнішнього середовища, Вт/(м²·°C);

$C_{oz,i}$ – питома теплоємність матеріалу i -го огороження, Дж/(кг·°C);

$\rho_{oz,i}$ – щільність матеріалу i -го огороження, кг/м³;

δ_i – товщина i -го огороження, м;

$i=1,2,3\dots n$.

Одержана система диференціальних рівнянь (1), (6), (10) – (13) є вихідною математичною моделлю ГКПД, до складу якої входить значення швидкості сушіння dU/dt .

Для грубих шарів:

$$- \frac{dU}{dt} = \frac{D\rho^2}{4R^2} (U - U_p), \quad (14)$$

де R – половина товщини дошки, м;

D – коефіцієнт вологопровідності фруктів, м²/с;

U_p – рівноважна вологість фруктів, кг/кг.

Для $\varphi = 0 - 0,5$

$$U_p = 0,36 \left(13,9 - \frac{a_c + 273}{100} \right) \frac{1}{\varphi} \times 10^{-2} + 0,72j \left(29,5 - \frac{a_c + 273}{100} \right) \frac{1}{\varphi} \times 10^{-2} ; \quad (15)$$

для $\varphi = 0,5 - 1,0$

$$U_p = \frac{0,512 \times 10^{-2}}{1,21 - j} \left(21,5 - \frac{a_c + 273}{100} \right) \frac{1}{\varphi} \quad (16)$$

У виразах (15) і (16) відносна вологість агенту сушіння:

$$j = \frac{P_n}{P_n} , \quad (17)$$

де P_n – парціальний тиск водяної пари у сушильному агенті, Па;
 P_n – тиск насиченої пари при температурі перегрітої пари, Па.

$$P_n = \frac{PX}{0,622 + X} , \quad (18)$$

де P – атмосферний тиск, Па.

Значення P_n визначається за імперичним виразом Філоненка:

$$\lg \frac{P_n}{P_0} = \frac{7,5t_c}{238 + t_c} , \quad (19)$$

де P_0 – тиск насиченої пари при температурі 0°C, Па.

Для одержання в математичному описі вихідної температури t_m агенту сушіння за «змоченим» термометром слід вологовміст X агенту сушіння визначити через t_m і t_c :

$$t_m = t_c - \frac{r_M(X_M - X)}{C_{нов} + C_n X} , \quad (20)$$

де r_M і X_M – прихована теплота паротворення і вологовмісту агента сушіння при температурі t_m .

Залежність $t_m = f(t_c, X)$ для обмеженого діапазону змінювання t_m також можна визначити за $I-d$ -діаграмою

$$t_m \approx C_0 + C_1 X + C_2 t_c, \quad (21)$$

де C_0, C_1, C_2 – сталі коефіцієнти.

Одержані диференціальні рівняння (1), (6), (10) – (13), а також вирази, які визначають зв'язок між параметрами агенту сушіння, є нелінійними. Проте, виходячи із постановки завдання автоматичного регулювання (вимоги щодо малих відхилень параметрів) і враховуючи безперервність і рівномірність математичних залежностей, які поєднують між собою параметри сушильних камер, їх можна лінеаризувати на малих інтервалах змінювання вихідних даних. Лінеаризація виконується на підставі припущення сталості теплофізичних величин: коефіцієнта теплопередачі, вологопровідності, вологовіддачі фруктів, питомих теплоємностей, щільності у межах незначних відхилень вихідних параметрів ГКПД, а також розкладання інших нелінійних залежностей у ряд Тейлора довкола «точки усталеного процесу сушіння».

Для конкретних сушильних камер і умов сушіння, виконавши нескладні математичні перетворення, зумовлені лінеаризацією наведених рівнянь і виразів, можна одержати систему лінійних диференціальних рівнянь із незначними відхиленнями змінних параметрів, які характеризують процес сушіння, тобто ГКПД можна розглядати як стаціонарну лінійну динамічну модель простішу серед класу динамічних моделей. Хоча це й грубе наближення до реальних процесів, що відбуваються у камері, але воно досить точно характеризує досліджувану ГКПД як об'єкт керування.

Через різні підходи до розв'язання задач синтезу і аналізу систем автоматичного керування процесом сушіння фруктів, математичну модель ГКПД опишемо за Лапласом (зображення) у вигляді рівнянь типу «Вхід – Вихід», а також за часом у вигляді рівнянь стану.

Застосовуючи безпосереднє перетворення Лапласа

$$F_p(p) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-pt} dt$$

для відносного приросту змінних, наведених на схемі (рис. 1), з урахуванням нульових початкових умов, одержимо рівняння типу «Вхід – Вихід»:

$$L(p)Y(p) = G(p)U_1(p) + R(p)F(p), \quad (22)$$

де $L(p) = [t_n^*(p)X^*(p)U^*(p)t_n^*(p)]^T$ – вектор стовпець вихідних координат;

$U_1(p) = [t_n^*(p)G_n^*(p)v^*(p)L_0(p)L_1^*(p)]$ – вектор стовпець вхідних (керуючих) координат;

динат;

$F = [t_{nos}^*(p) t_{31}^*(p) \dots t_{3,n}^*(p)]$ – вектор стовпець збурень;

T – знак транспортування;

p – комплексна змінна;

$*$ – відносний приріст відповідних змінних;

$L(p)$, $G(p)$ і $R(p)$ – матриці, елементи яких у загальному випадку є многочленами і сталими коефіцієнтами стосовно p .

Коефіцієнти елементів матриць $L(p)$, $G(p)$ і $R(p)$ передаються величинами, які входять до складу вихідних рівнянь і виразів.

На підставі матричного рівняння (22) можна записати передаточні функції сушильної камери на каналах керування і збурення:

$$W_{\kappa}^j = \frac{y_j^*(p)}{u_{\kappa}^*(p)} = \frac{\det L_{\kappa}^j(p)}{\det L(p)} \quad \text{і} \quad V_l^j = \frac{y_j^*(p)}{f_l^*(p)} = \frac{\det L_l^j(p)}{\det L(p)}, \quad (23)$$

де $\det L(p)$ – визначник матриці $L(p)$;

$\det L_i^j(p)$ і $\det L_{\kappa}^j(p)$ – визначники, які одержують із матриці $L(p)$ заміною стовпця із i -им параметром вихідних координат $y_j^*(p)$ відповідно стовпцям із k -ою вхідною координатою $u_{\kappa}^*(p)$ із матриці $G(p)$ і стовпцем із l -им збурюючим параметром $f_l^*(p)$ із матриці $R(p)$.

Із урахуванням виразу (23), лінійну динамічну модель ГКПД як об'єкт керування описують таким матричним рівнянням:

$$Y(p) = W(p)U_1(p) + V(p)F(p); \quad (24)$$

де $W(p) = [w_{\kappa}^l(p)]$ і $V(p) = [v(p)]$ – матриці сушарки.

Виходячи із практичних завдань синтезу автоматичного регулювання, для конкретного прикладу ГКПД, наведеного нижче, рівняння стану ГКПД:

$$X(t) = AX(t) + B_v U_1(t) + B_f F(t); \quad (25)$$

$$Y(t) = CX(t), \quad (26)$$

де $X(t) = [t_{\kappa}^*(t) t_c^*(t) t_m^*(t) t_{op}^*(t) U^*(t) t_{oz}^*(t)]^T$ – вектор стовпець параметрів стану;

$U_1(t) = [t_n^*(t) C_n^*(t) L^*(t)]^T$ – вектор стовпець керування;

$F(t) = t_3^*(t)$ – збурюючий параметр – температура зовнішнього середовища;

$Y^T(t) = [t_c^*(t) t_m^*(t)]^T$ – вектор стовпець вимірюваних вихідних параметрів;
 A , B_v , B_f , і C – сталі матриці відповідних розмірностей.

Таким чином, на підставі аналізу тепло- і масообмінних процесів, які відбуваються у ГКПД, одержано їх загальний математичний опис у вигляді системи диференціальних рівнянь і відповідних обмежень, які характеризують даний клас сушильних камер, як об'єктів керування і призначені для використання як математичні моделі у системах керування процесом сушіння фруктів. При цьому лінеаризований варіант математичного опису можна подавати у вигляді рівнянь стану і типу «Вхід – Вихід».

3 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Для побудови математичної моделі досліджуваного процесу використовували відомий метод планування повнофакторного експерименту за схемою 2^2 (тобто 2 фактори на 2 рівнях значущості).

Для проведення досліджень щодо ефективності процесу сушіння в геліосушарці були обрані місяці, коли більшість фруктів досягають стадії дозрівання, а саме липень і вересень. Конкретні дати досліджень включали 15 липня – 3 вересня 2022 року та 15 липня – 3 вересня 2023 року.

У процесі сушіння фізичні параметри навколишнього середовища коливалися в таких межах: температура повітря (T_{nc}) від 16 до 30°C; відносна вологість повітря (φ_{nc}) від 26% до 86,8%; енергетична освітленість (E) від 100 до 800 Вт/м²; кут падіння прямого сонячного випромінювання (кутів падіння) від 20 до 60 градусів.

Теплотехнічні параметри повітря, яке подавалося до сушильної камери, в денний час (від 8⁰⁰ до 21⁰⁰ години) включали температуру T_{mn} від 20 до 60°C, а в нічний час (від 22⁰⁰ до 7⁰⁰ години) від 30 до 20°C. Швидкість циркуляції повітря (v_{mn}) коливалася від 1 до 3 метрів на секунду, а відносна вологість (φ_{mn}) від 9,8% до 86%.

Теплопродуктивність повітряного колектору Q для поглинальної поверхні S_{nk} розміром 1,5 м² знаходилася в діапазоні від 117 до 480 Вт. Температура акумулятора (T_{ma}) в денний час (від 8⁰⁰ до 21⁰⁰ години) варіювала від 30,5 до 45,6°C, а в нічний час (від 22⁰⁰ до 7⁰⁰ години) від 45,6 до 20,9°C.

У таблиці 1 представлено інформацію щодо специфіки геліосушарки та об'єктивних умов, в яких вона функціонувала під час проведення серії досліджень.

Таблиця 1. Представлені умови та результати сушіння яблук і груш у геліосушарці під час дослідів, який відбувся протягом періоду з 15 липня по 3 вересня 2023 р.

№ з/п	Дата	Тривалість, год.	Конфігурація	
			ТА	ДК
1	15 – 17.07	50	+	+
2	15 – 21.07	119	–	–
3	28 – 31.07	74	–	–
4	07 – 10.08	77	–	–
5	10 – 12.08	50	+	+
6	15 – 17.08	50	+	+
7	31 – 3.09	98	–	–

4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Тривалість процесу сушіння фруктів у геліосушарці залежить від того, наскільки швидко висушуваний матеріал віддає вологу в зоні, де діє теплоносій та змінюються залежно від координати x і часу:

$$J_m = -D \times r_{np} \times (DU \pm d_T \times DT(t)), \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}). \quad (27)$$

Аналіз результатів (рис. 2 та 3) виявив, що криві інтенсивності сушіння, (J_m) для яблук з вологовмістом U від 2,89 до 0,24 кг вологи на 1 кг сухої речовини перебуває у діапазоні від 1,57 до 0,18 кг/(м²·с), а для груш з вологовмістом U від 3,36 до 0,39 кг вологи на 1 кг сухої речовини від 1,58 до 0,049 кг/(м²·с)

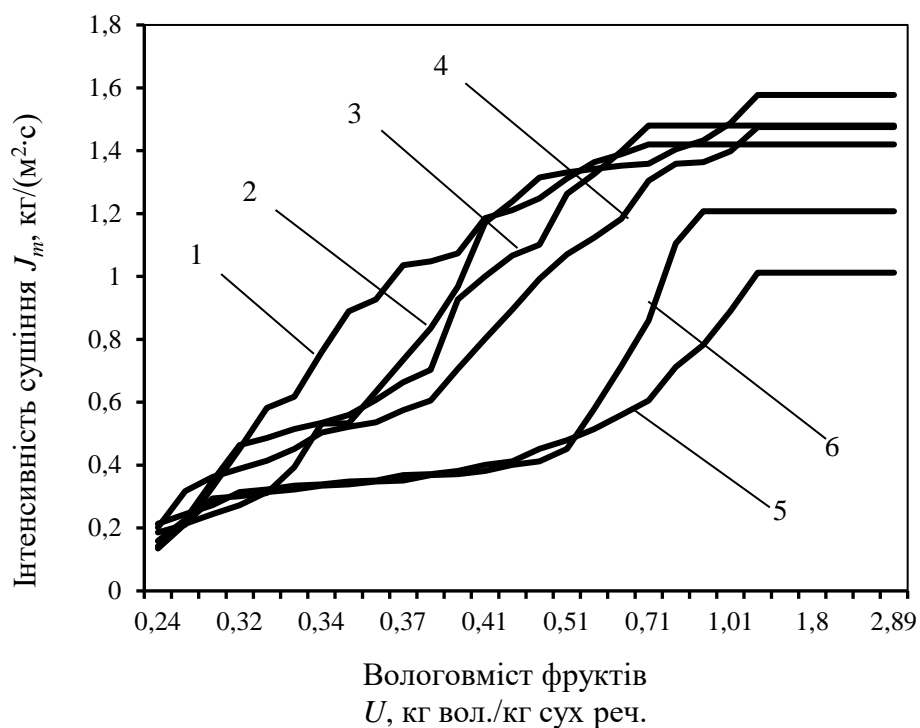


Рис. 2. Криві інтенсивності сушіння яблук з товщиною нарізки кружечків:
1, 2 – 5 мм; 3, 4 – 8 мм; 5, 6 – 11 мм

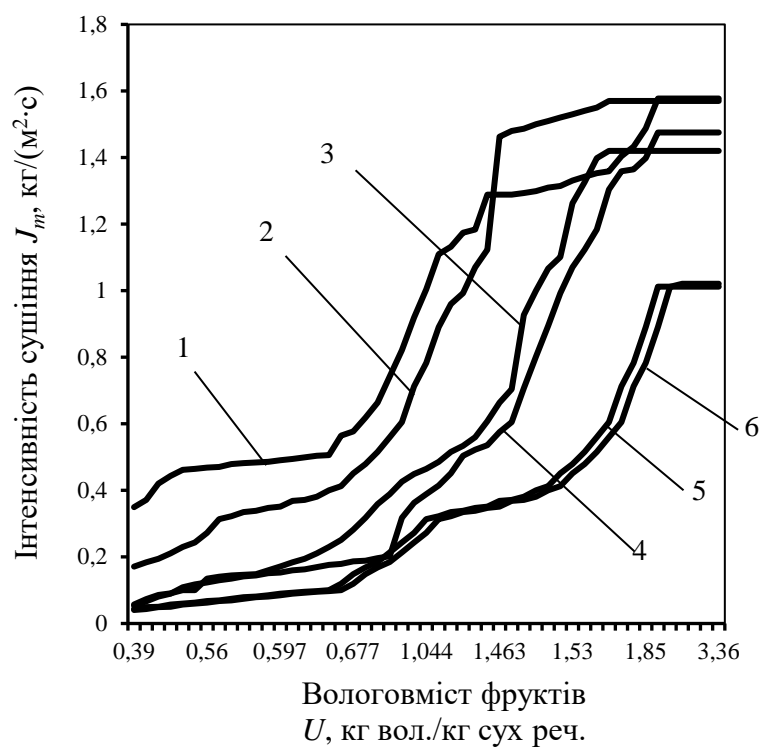


Рис. 3. Криві інтенсивності сушіння груш з товщиною нарізки дольок: 1, 2 – 5 мм; 3, 4 – 6 мм; 5, 6 – 7 мм

Отже, аналіз порівняльних експериментальних кривих інтенсивності сушіння (рис. 2 та 3) свідчить, що геліосушарка під час сушіння забезпечує однакову інтенсивність і тривалість процесу сушіння.

5 УПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Розроблена геліосушарка на базі відновлюваних джерел енергії сприятиме інтенсифікації процесу сушіння і освоєння їх виробництва, та водночас позитивному впливу на вирішення екологічних проблем енергетики за рахунок заміщення електричної та теплової енергії, отриманої з використанням сонячної енергії, та частковому вирішенню соціальних проблем завдяки створенню нових робочих місць при виготовленні, монтажі та експлуатації таких установок.

Реалізацію наших досліджень було подано у вигляді інженерних методів для розрахунку і прогнозування процесів конвективно-радіаційного сушіння зі змінними потенціалами тепломасоперенесення, які є базою для прогнозування інтенсивності сушіння та підставою для розробки й вдосконалення раціональних та енергоощадних як технологій, так і сушильних установок. Практичну цінність даних досліджень представляє новий тип обладнання для використання сонячної теплової енергії в процесах сушіння матеріалу, визначення параметрів конвективно-радіаційного теплообміну в процесі сушіння, що є базою для проектування нових конструкцій сушарок та створення на їх основі енергоощадних технологій сушіння.

Частина отриманих при цьому результатів досліджень опублікована у наступних роботах:

1. Korobka, S., Syrotyuk, S., Zhuravel, D., Boltianskyi, B., Boltianska, L. Solar dryer with integrated energy Unit. Problems of the Regional Energetics, 2021, (2). 60-75 (**Scopus**).
2. Syrotyuk S., Boyarchuk V., Syrotyuk V., Korobka S., Syrotyuk H., Boltianskyi B. Peculiarities of modeling heat pumps in the labview environment. Інформаційні технології в енергетиці та агропромисловому комплексі: матеріали XI Міжнарод. наук. конференції (Львів, 04-06 жовтня 2022 р.) / ЛНУП: За заг. ред. В.В. Снітинського. Львів: ЛНУП, 2022. С. 16-18.
3. Болтянський Б.В., Болтянська Л.О. Альтернативні напрями енергозбереження в домогосподарствах населення. XII Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Ефективність функціонування сільськогосподарських підприємств». Проблематика 2023: «Функціонування сільськогосподарських підприємств на засадах циркулярної економіки»: матеріали міжнарод. наук.-практ. Інтернет-конференції, ЛНУП, Дубляни, 6-7 червня 2023 р. / за ред. проф. Г.В. Черевка. Львів: Галицька видавнича спілка, 2023. С. 26-30.

4. С.В. Коробка, Р.Є. Кригуль, М.І. Бабич, І.Г. Стукалець, С.В. Сиротюк, Б.В. Болтянський. Опис виробничої геліосушарки з тепловим насосом. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В.М. Кюрчев. Запоріжжя: ТДАТУ, 2023. Вип. 23, т. 1. С.145-152. DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-1-145-152.
5. С.В. Коробка, І.Г. Стукалець, С.В. Сиротюк, О.Г. Скляр, Р.В. Скляр, Б.В. Болтянський, С.М. Баранович. Математичне моделювання процесу сушіння фруктів у геліосушарці. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В.М. Кюрчев. Запоріжжя: ТДАТУ, 2023. Вип. 23, т. 2. С.78-98. DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-2-78-98.

ВИСНОВКИ

1. Розроблено математичні моделі (вирази (1), (6), (10) – (13)) процесу сушіння сільськогосподарських продуктів у геліосушарці, які дозволяють розрахувати показник поглинання вологи у ситуаціях, коли відбувається дифузний перенос вологи всередині матеріалу, і також регулювати глибину проникнення теплового потоку в поверхневий шар, де відбуваються фазові перетворення.

2. Визначено збіжність інтенсивності сушіння, використовуючи аналіз відносної похибки, що дало можливість переконатися у відповідності отриманих результатів, порівнюючи їх з відомими експериментальними даними.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- Озарків І. М., Кобринович М. С., Копинець З. П. Особливості перенесення вологи в процесі сушіння фруктів. Науковий вісник Національного лісотехнічного університету. 2007. Вип. 17.4. С. 124-125.
- Pathare, P. B. Effective moisture diffusivity of onion slices undergoing infrared convective drying. *Biosystems Engineering*. 2006. N. 93 P. 285-291.
- Goyal, R. K. Kingsly A. R. P., Manikantan M. R., Piyas S. M. Mathematical modeling of thin layer drying kinetics of plum in a tunnel dryer. *Journal of Food Engineering*. 2007. N. 79 P. 176-180.
- Garau, M. C. Drying of orange skin: drying kinetics modeling and functional properties. *Journal of Food Engineering*. 2006. N. 75 P. 288-295.
- Menges, H. O. Thin layer drying model for treated and untreated Stanley plums. *Energy Conversion and Management*. 2006. N. 47 P. 2337-2348.
- Скляр Р.В. Доцільність використання економіко-математичних моделей в сільському господарстві. Інноваційні технології в АПК: матеріали VII Всеукраїнської науково-практичної конференції. Луцьк: Луцький НТУ. 2021. С. 122-124.
- Скляр О.Г., Скляр Р.В., Григоренко С.М. Методика моделювання та оптимізації структури посівних площ. Науковий вісник ТДАТУ. Запоріжжя: ТДАТУ, 2023. Вип. 13, том 1. №7. DOI: 10.31388/2220-8674-2023-1-7.
- Midilli, A., Kucuk N. Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy. *Energy Conversion and Management*. 2003. N. 44(7) P. 1111-1122.
- Wang, Z. J. Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace. *Journal of Food Engineering*. 2006. N. 40. P. 39-46.
- Геліосушарка з тепловим акумулятором: пат. 97139 U Україна: МПК А23L3/00 / Коробка С. В.; заявник та патентовласник Коробка С. В. № UA 97139 U; заявл. 26.12.2014; опубл. 25.02.2016, Бюл. № 4. - 3 с.
- Korobka, S., Babych M. Substantiation of the constructive-technological parameters of a solar fruit dryer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. N. 1/8 (85). P. 13-19.
- Korobka, S., Syrotyuk, S., Zhuravel, D., Boltianskyi, B., Boltianska, L. Solar dryer with integrated energy Unit. *Problems of the Regional Energetics*, 2021, (2). 60-75.
- Syrotyuk S., Boyarchuk V., Syrotyuk V., Korobka S., Syrotyuk H., Boltianskyi B. Peculiarities of modeling heat pumps in the labview environment. Інформаційні технології в енергетиці та агропромисловому комплексі: матеріали XI Міжнар. наук. конференції (Львів, 04–06 жовтня 2022 р.) / ЛНУП: За заг. ред. В. В. Снітинського. Львів: ЛНУП, 2022. С. 16-18.
- Шершенівський О.С. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів геліосушарки. Матеріали V Всеукраїнської науково-технічної Інтернет-конференції студентів та магістрантів за підсумками наукових досліджень 2017 року «Проблеми механізації та електрифікації технологічних процесів». Мелітополь:

ТДАТУ, 2018. – Випуск V. С. 158-161.

- A. Skliar, B. Boltianskyi, N. Boltianska, D. Demyanenko. Research of the cereal materials micronizer for fodder components preparation in animal husbandry. *Modern Development Paths of Agricultural Production*. - Springer Nature Switzerland AG, 2019. С.249-259.
- Болтянський Б.В., Болтянська Л.О., Сиротюк С.В. Аналіз структури витрат енергії при виробництві сільськогосподарської продукції. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали І Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції (Мелітополь, 01-24 квітня 2020 р.) / ТДАТУ: ред. кол. В.М. Кюрчев, В.Т. Надикто, О.Г. Скляр [та ін.]. - Мелітополь: ТДАТУ, 2020. С.436-442.
- Мозговий Я.Ю. Розрахунок навантаження сонячної радіації для гарячого водозабезпечення корівника на 200 голів. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали І Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції (Мелітополь, 01-24 квітня 2020 р.) / ТДАТУ: ред. кол. В.М. Кюрчев, В.Т. Надикто, О.Г. Скляр [та ін.]. - Мелітополь: ТДАТУ, 2020. С. 449-453.
- Тристан Р.В. Розрахунки щодо автономного енергозабезпечення фермерського господарства. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали І Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції (Мелітополь, 01-24 квітня 2020 р.) / ТДАТУ: ред. кол. В.М. Кюрчев, В.Т. Надикто, О.Г. Скляр [та ін.]. - Мелітополь: ТДАТУ, 2020. С. 465-468.
- Болтянський Б.В. Енерго- та ресурсозбереження в тваринництві: підручник / Б.В. Болтянський та ін. К.: Видавничий дім «Кондор», 2020. 410 с.
- Кисельова Л. Експериментальні дослідження режимів теплообміну при первинній обробці молока. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали І Міжнар. наук.-практ. конф. мол. учених. Мелітополь: ТДАТУ, 2021. С.52.
- Болтянська Л.О., Болтянський Б.В. Аспекти механізму інвестиційного забезпечення інновацій у відновлюваній енергетиці АПК України: матеріали І Міжнар. наук.-практ. конф., 14 трав. 2021 р. Аграрна галузь сучасної України: проблеми та перспективи розвитку // М-во освіти і науки України, Ін-т модернізації змісту освіти, Луган. нац. аграр. ун-т, Проект USAID «Економічна підтримка Східної України», Білорус. держ. аграр. техн. ун-т, Донбас. держ. машинобуд. акад., Укр. клуб. аграр. бізнесу. – Слов'янськ, 2021.
- С.В. Коробка, Р.Є. Кригуль, М.І. Бабич, І.Г. Стукалець, С.В. Сиротюк, Б.В. Болтянський. Опис виробничої геліосушарки з тепловим насосом. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В.М. Кюрчев. Запоріжжя: ТДАТУ, 2023. Вип. 23, т. 1. С.145-152. DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-1-145-152.
- С.В. Коробка, І.Г. Стукалець, С.В. Сиротюк, О.Г. Скляр, Р.В. Скляр, Б.В. Болтянський, С.М. Баранович. Математичне моделювання процесу сушіння фруктів у геліо-

сушарці. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В.М. Кюрчев. Запоріжжя: ТДАТУ, 2023. Вип. 23, т. 2. С.78-98. DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-2-78-98.