

Юрій Матус¹, Тетяна Осипова², Борис Гусєв³, Андрій Сагун⁴

¹старший викладач кафедри комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки
Національний університет біоресурсів та природокористування України (Київ, Україна)
E-mail: umatius@nubip.edu.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0974-4789>

²кандидат педагогічних наук, доцент кафедри комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки
Національний університет біоресурсів та природокористування України (Київ, Україна)
E-mail: t_osipova@nubip.edu.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9199-3436>

³кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки
Національний університет біоресурсів та природокористування України (Київ, Україна)
E-mail: gusevbs@nubip.edu.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1658-7822>

⁴кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки
Національний університет біоресурсів та природокористування України (Київ, Україна)
E-mail: a.sagun@nubip.edu.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5151-9203>

**ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ СИСТЕМ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ
РІШЕНЬ З ІНФРАЧЕРВОНОГО СУШІННЯ ЗЕРНА**

У статті представлено результати науково-методичного дослідження проблеми інформаційної підтримки технологічних процесів сушіння зерна на основі технології інфрачервоного випромінювання. Наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень. Запропонована удосконалена модель процесу інфрачервоного сушіння для зернових культур, яка на відміну від існуючих орієнтована на застосування в системах підтримки прийняття рішень при організації процесу сушіння. Результатами експериментів доведено, що за рахунок значного збільшення щільності теплового потоку на поверхні опромінюваного матеріалу та проникнення всередину матеріалу інфрачервоних променів, використання інфрачервоних променів посилює процес сушіння зерна. Доведено, що використання сучасних інформаційних технологій, раціональних схем і режимних параметрів процесів інфрачервоного сушіння зерна, дозволять скоротити час видалення вологи при «дбайливих» режимах сушіння для забезпечення необхідних якісних показників продукту. Доведено, що застосування сучасних інформаційних технологій, керованого плану процесу інфрачервоного сушіння зерна та параметрів моделі дозволить скоротити час сушки та забезпечити відповідність вимогам якості до отриманої продукції.

Ключові слова: сушка; інфрачервоне; зерно; комп'ютерні системи.

Рис.: 5. Табл.: 4. Бібл.: 9.

Актуальність теми дослідження. Швидкий розвиток інформаційних технологій зумовлює зміну багатьох технологічних процесів у виробництві. Поява нових розумних датчиків і пристроїв дозволяє значно вдосконалити процеси й підходи у процесі управління технологічними процесами, зокрема процесами інфрачервоного сушіння зерна. Існуючі ймовірнісні моделі підтримки прийняття рішень не відповідають сучасним вимогам до систем керування процесами сушки зерна. Зазначені проблеми зумовили актуальність теми тематики статті, її цілеспрямованість та зміст.

Постановка проблеми. Ефективність електротехнічних методів інфрачервоного (ІЧ) випромінювання зумовлена використанням нових, науково обґрунтованих методів опромінення матеріалу та застосування розумних контролерів, нових сучасних технологій та IoT-систем. Необхідність та ефективність інформаційного забезпечення процесу інфрачервоного сушіння зерна залежить від потреб управління процесом, що дає змогу забезпечити високі техніко-економічні показники за рахунок зменшення втрат кінцевого продукту, витрати сировини, умовного палива чи електроенергії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наприкінці ХХ століття різко зріс інтерес до застосування ІЧ сушіння в сільському господарстві [1-7]. Слід зазначити, що існуючі методи використання енергії інфрачервоного випромінювання для покращення сушки зерна до кінця не досліджені та не враховані у процесі активної вентиляції зернової маси. У роботах [3-8] авторами було показано, що швидке підвищення температури матеріалу після критичної точки, при безперервному ІЧ сушінні, викликає погіршення властиво-

стей зерна. При цьому значний температурний градієнт уповільнює внутрішній масоперенос. Недостатньо відпрацьована технологія осцилюючого ІЧ сушіння та відсутність автоматизації регулювання підведення теплових потоків до матеріалу не дозволило адаптувати імпульсну ІЧ сушку для широкого застосування на елеваторах та зерноскладах.

Сучасна електроніка дозволяє керувати нагрівальними приладами та іншою технікою, необхідною для забезпечення оптимального режиму сушіння. У цьому випадку головним є інформаційне забезпечення процесу прийняття рішення щодо вибору конкретного режиму інфрачервоної технології сушіння, при цьому необхідно враховувати не тільки початкову вологість матеріалу, його оптичні та біологічні характеристики. Виконана перевірка адекватності запропонованих математичних моделей показала, що розбіжність між різними математичними моделями досить велика (7-12 %) [6; 7]. При цьому всі автори, що досліджують проблему моделювання процесу сушіння, зазначають, що навіть незначне перевищення порогового значення температури сушильного агента (звичай повітря) призводить до зниження схожості зерна та денатурації білків [6-9].

Існування різних сценаріїв процесу ІЧ сушіння зерна вимагає використання методу ідентифікації ситуації у вигляді набору експертних знань про характеристики матеріалу та доцільності створення модуля системи інформаційної підтримки інфрачервоного сушіння зерна (СПІЧСЗ). Інформаційна підтримка процесу інфрачервоного сушіння має включати розробку і аналіз інформації про матеріал та бази даних аналізу, а також визначення модуля прогнозування теплоємності, вмісту вологи, білка та клейковини тощо, що дозволяють знизити втрати в процесі ІЧ сушіння, у порівнянні з традиційною технологією управління процесом.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Враховуючи погляди попередніх досліджень, існує необхідність у подальшому розвитку математичних моделей, а також інформаційних технологій, що використовуються в системах підтримки прийняття рішень з ІЧ сушіння зерна елеваторів та зерноскладах.

Метою статті є подальший розвиток математичних моделей для обчислювального ядра системи підтримки прийняття рішень в процесі ІЧ сушіння зерна та удосконалення інформаційної технології підтримки процесу сушіння.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- розробити математичну модель процесу інфрачервоного сушіння зерна, що дозволить обґрунтовувати вибір стратегії інформаційної підтримки та автоматизації цього процесу;
- розробити методику та алгоритм розрахунку щільності падаючого теплового потоку на поверхню зернової маси в сушильній камері з урахуванням факторів, що впливають на проникнення ІЧ хвиль у такі капілярно-пористі продукти, як зерно, крупа;
- розробити модуль системи інформаційної підтримки інфрачервоного сушіння зерна (СПІЧСЗ), що дозволить вибирати раціональні конструктивні та режимні параметри СПІЧСЗ зі зменшеними питомими енерговитратами, та провести чисельні дослідження впливу різних параметрів СПІЧСЗ на процес сушіння та теплообміну в сушильних камерах.

Виклад основного матеріалу. На підставі проведеного аналізу було запропоновано схему системи інформаційної підтримки ІЧ сушіння зерна (СПІЧСЗ), з урахуванням зовнішніх та керуючих впливів (рис. 1).

З урахуванням теорії тепловіддачі інфрачервоного випромінювання отримано диференціальні рівняння тепло- і вологовіддачі зерна при двосторонньому нагріванні для інфрачервоного сушіння:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \nabla^2 T + \varepsilon \frac{r}{c_p} \frac{\partial Y}{\partial \tau}; \\ \frac{\partial Y}{\partial \tau} = \alpha \nabla^2 Y + D \delta \nabla^2 T \end{cases} \quad (1)$$

де δ – коефіцієнт термовологопровідності, 1/К; $\frac{\partial T}{\partial \tau}$ – градієнт температури, К/м; $\frac{\partial Y}{\partial \tau}$ –

градієнт містимої вологи; ε – коефіцієнт пропорційності $\varepsilon = \frac{F_{\text{эф}}}{F_{\text{пр}}} = \frac{F_{\text{эф}}^{\text{вид}}}{F_{\text{пр}}^{\text{вид}}}$ (вважаємо, що

поверхня джерела пропорційна видимій поверхні (проекції поверхні ІЧ випромінювання на площину, перпендикулярну променю), відношення ефективної випромінюючої поверхні спіралі $F_{\text{эф}}$ до прямої поверхні нікель-хромового сплаву $F_{\text{пр}}$); r – питома випаровувана теплота, КДж/кг; Δ^2 – оператор Лапласа; D – коефіцієнт пропускання матеріалом ІЧ випромінювання.

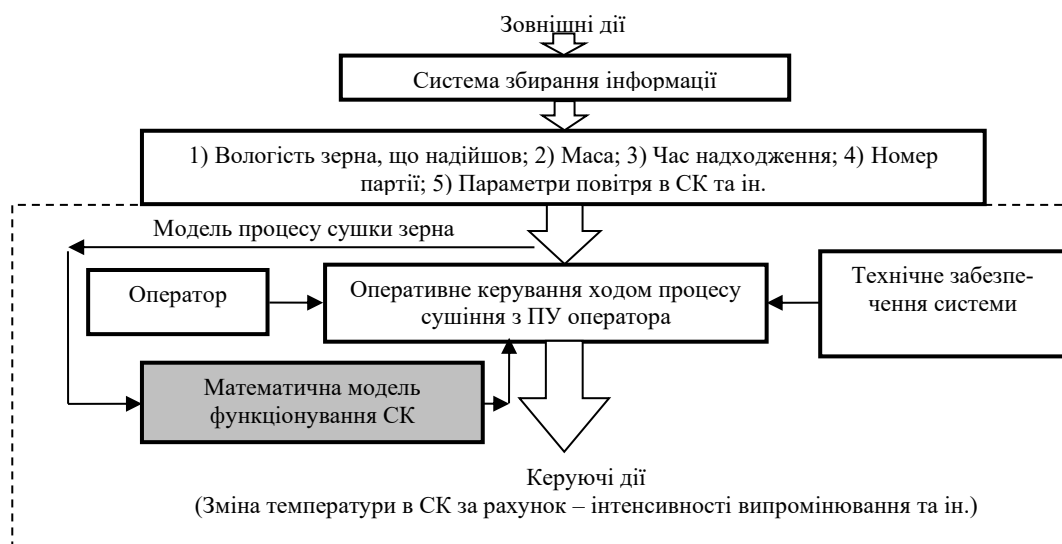


Рис. 1. Схема СПІЧСЗ

Джерело: розроблено авторами.

Інтегральне рівняння тепловологопереносу можна уявити так

$$q(\tau) = r \cdot \rho_0 \cdot R_v \frac{d\bar{Y}}{d\tau} + \rho_0 \cdot R_v \cdot c_p \frac{dT}{d\tau}, \quad (2)$$

де $R_v = v/F$ – відношення об'єму до поверхні тіла.

Таким чином, складові тепловологопереносу можна записати у вигляді таких рівнянь:

$$\begin{cases} q(\tau)_Y = r \cdot \rho_0 \cdot R_v \cdot \frac{dY}{d\tau}; \\ q(\tau)_T = \rho_0 \cdot R_v \cdot c_p \cdot \frac{dT}{d\tau}. \end{cases} \quad (3)$$

Отримані вище рівняння дозволяють визначити найголовніший параметр для СПІЧСЗ – вміст вологи в зерновій масі, тому що саме її кількість визначає якість інфрачервоної сушки.

Зовнішній теплообмін здійснюється шляхом вільної конвекції. При такому підході віддача теплоти залежить від форми та розмірів нагрівальної поверхні, температури цієї поверхні, температури зовнішнього середовища, коефіцієнта об'ємного розширення нагрівальної поверхні та інших її фізичних властивостей. Узагальнене рівняння для коефіцієнта віддачі теплоти a виражається функцією степеня n : $Nu = C(GrPr)^n$. Значення коефіцієнта C і степеневого показника n прямо залежать від режиму руху, який визначається поверхневою температурою продукту, різницею температур між продуктом та навколишнім середовищем, а також щільністю потоку теплоти від ІЧ випромінювача.

Розв'язком рівняння за крайових умов є функція $T = f(x, \tau, E_n, W_{нач})$. Щоб збільшити обидва види аргументів диференціації під час зневоднення зернової маси, замість води необхідно використовувати концентрацію сухої речовини:

$$\frac{\partial T}{\partial c_p} = \frac{a}{\frac{\partial c_p}{\partial \tau}} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{r \cdot \rho}{c_p \cdot \rho} + \frac{w}{\frac{\partial c_p}{\partial \tau} \cdot c_p \cdot \rho}. \quad (4)$$

У результаті реалізації математичної моделі процесу ІЧ сушки зерна повинні бути встановлені діапазони температур по шару зернової маси, залежно від концентрації сухих речовин, оптимального часу фокусування випромінювання при різних рівнях вологості зерна та ін. Розв'язок системи диференціальних рівнянь переносу теплоти і вологи в умовах, що відповідають комбінованому сушінню колоїдних капілярно-пористих матеріалів, та аналіз їхніх критеріїв подібності й коефіцієнта внутрішнього випаровування вологи показав, що переміщення води від внутрішніх до зовнішніх шарів відбувається з постійною швидкістю у вигляді пари.

Оскільки реалізація оптимальних умов сушіння, що постійно змінюються, на нинішньому технологічному рівні технічно мало реальна й економічно не виправдана, доцільно ввести дисконтну позонну оптимізацію сушіння за наступними етапами:

- застосовуючи рівняння кривих зневоднення, розраховуємо інтеграл функції швидкості сушіння;
- вираховуємо цільову функцію – множимо сумарну інтегральну швидкість сушіння на параметр, який пропорційно впливає на продуктивність усього процесу сушіння;
- визначаємо значення оптимальних параметрів у кожній зоні сушки, максимальне значення шуканої функції в уточнених межах зон у раціональному режимі сушіння (наприклад, на етапі апробації математичної моделі можна використати програму Mathcad, застосовуючи опцію «maximize»);
- одержуємо апроксимуючі рівняння швидкості сушіння зерна по зонах у раціональному режимі (при заданих оптимальних параметрах сушки);
- з'ясовуємо тривалість сушки зернової маси за умови максимуму цільової функції.

Для СППЧСЗ система рівнянь доповнена статичною характеристикою, що дозволяє визначити кількість вологи, що видаляється в процесі сушки зерна – W (або вміст води u) в j -ій серії регулювання за значеннями параметрів, що регулюються (q – середній питомих потік теплової енергії по шару зернової маси (регульований параметр), Вт/м²; V – швидкість руху зернової маси (регульований параметр), м/с; P – питома потужність джерела ІЧ випромінювання, у j -ій і $(j-1)$ серіях; τ – час ІЧ випромінювання, с.

При розгляді реального процесу сушіння зерна на стрічці конвеєра сушильного агрегату, можливі ситуації нерівномірної висоти шару зерна, що опромінюється. Отже, тепло від ІЧ випромінювання, нерівномірно проникає в шар зерна й у різних шарах зернової маси має різну температуру. Тому кожен шар зерна описаний своїм рівнянням, використовуючи процедури побудови математичної моделі кожного шару.

Для першого зернового шару (підвід теплоти безпосередньо від ІЧ джерела)

$$dT / d\tau = k_1 \cdot (T_{ук} - T_1) + k_2 \cdot (T_2 - T_1) - k_3 \cdot (T_0 - T_1).$$

При цьому зміна температури в i -ому і n -ому шарі можна описати відповідно такими рівняннями:

$$dT_i / d\tau = k_2 \cdot (T_{i+1} - T_i) + k_2 \cdot (T_{i-1} - T_i); dT_n / d\tau = k_2 \cdot (T_{n+1} - T_n).$$

Фактична температура в сушильній камері перетворюється на сигнал пристроєм $T\phi$. Позначаючи сигнали на виході цих пристроїв аналогічними літерами, висловимо відхилення фактичне від необхідного у вигляді сигналу: $\Delta T = T_{\Sigma} - T\phi$, який називається сигналом відхилення або неузгодженістю.

З урахуванням сушіння по шарах система виглядатиме таким чином:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dT}{d\tau} = \frac{Q - F \cdot \chi \cdot (C_s \cdot T_n^4 - C_o \cdot T_o^4)}{m \cdot c}; \\ dT_i / d\tau = k_2 \cdot (T_{i+1} - T_i) + k_2 \cdot (T_{i-1} - T_i); \\ dT_n / d\tau = k_2 \cdot (T_{n+1} - T_n); \\ \frac{\partial \eta}{\partial \tau} = \frac{\partial \xi}{\partial \Lambda_{\zeta}}; \\ \frac{\partial T}{\partial W} = \frac{a}{\partial w / \partial \tau} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{r \cdot \rho}{c \rho} + \frac{w}{\partial w / \partial \tau \cdot c \rho}; \\ \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{E_{p, \text{гран.}} + \alpha \cdot (T_o - T_{x=0(\text{нов.})})}{-\lambda(W)}; \\ \left(\frac{\partial \Delta F}{\partial U_p} \right)_{T, P} = \left(\frac{\partial \Delta E}{\partial U_p} \right)_{T, P} - T_0 \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial U_p} \right)_{T, P} \end{array} \right. \quad (5)$$

Застосування сучасних датчиків СППЧСЗ дозволяє по-новому підійти до питання моделювання даного процесу. При цьому нелінійна модель може коригуватися за результатами вимірювань у процесі роботи технологічного обладнання та безпосередньо використовуватись в оперативному управлінні. Для проведення експериментальних досліджень доопрацьовано установку для термообробки зерна, що складається з жолоба, конвеєра та нагрівальних елементів, що дозволяють змінювати щільність теплового потоку, що підводиться до зернової маси залежно від зміни часу із застосуванням отриманих математичних моделей та використанням системи інформаційної підтримки.

В алгоритмі роботи СППЧСЗ краще вибрати більш простий варіант моделювання, з урахуванням того, що завдання відноситься до завдань нестационарної теплопровідності.

$$\frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial \tau} = \lambda \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + E(x, y, \tau, T). \quad (6)$$

Це рівняння описує динаміку розподілу $T(x, y, \tau)$ на поверхні матеріалу залежно від часу. Фізичний смисл коефіцієнту λ , який може бути функцією як координат, так і самої температури, полягає в завдання швидкості перетікання тепла від більш нагрітих шарів матеріалу в менш нагріті. Функція $E(x, y, \tau, T)$ визначає приплив тепла ззовні, тобто від ІЧ джерел тепла, які також залежать від просторових координат (що задає локалізацію джерел), і від часу та температури.

Виконано перевірку адекватності отриманої моделі в середовищі MathCAD, за таких додаткових умов:

- граничні умови, тобто динаміку функції $T(x, y, \tau)$ і (або) її похідних на межах розрахункової області;
- початкову умову, тобто функцію $T(x, y, \tau)$.

На підставі аналізу отриманих розрахункових даних зроблено висновки про динаміку випаровування вологи при ІЧ сушінні та теплопровідності шару при різних початкових параметрах ІЧ джерела випромінювання.

Порівняння розрахункових значень інтенсивності ІЧ випромінювання по ширині зернової маси показало (рис. 2, 3), що ширина поля рівномірного опромінення збігається з проектними значеннями та швидкість зменшення інтенсивності ІЧ потоку на краю зони сушіння істотно не впливає на температурні поля, створюваними джерелами.

В області значень вологості $Y \leq 28\%$ зі зменшенням Y знижуються значення α . Це пояснюється тим, що швидкість зміни температури в повітрі при ІЧ нагріванні вище, ніж у воді і волога в шарі зі збільшенням її вмісту насичує пори і виступає на поверхні, що сприяє зменшенню швидкості температури. В області підвищених значень вологості ($Y \geq 28\%$) значення α практично постійне, оскільки волога з матеріалу виступила в такій кількості, при якому швидкість зміни температури вже не зменшується, а зростає лише тепловий потік.

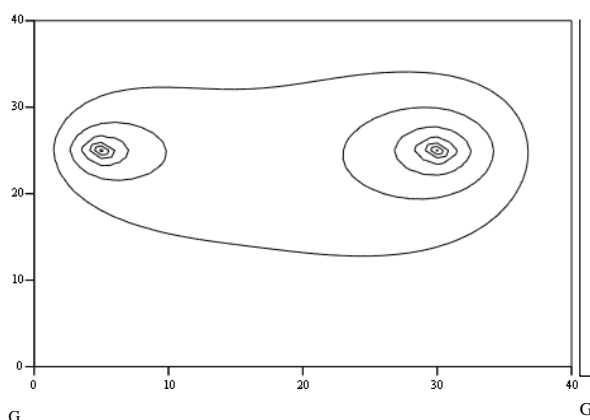


Рис. 2. Розподіл теплових потоків по поверхні зернового шару при ІЧ підводі теплоти

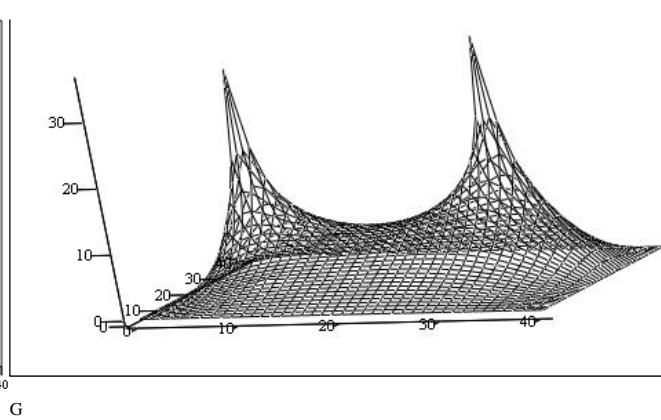


Рис. 3. Розподіл теплових потоків по глибині шару

Характер зміни теплопровідності можна пояснити різними формами зв'язку вологи з матеріалом. При вологості зерна до 30% волога заповнить дрібні пори, і після їх насичення перетворюється на міжзерновий простір; при цьому λ менше, оскільки в пори матеріалу замість води входить повітря, теплопровідність якого значно менша, ніж рідини. У матеріалі з високою вологістю відбувається різке збільшення λ за рахунок поверхневої вологи, оскільки волога виступає на поверхню окремих зерен і утворює водяні теплові «містки» у місцях контакту частинок матеріалу.

Лабораторні дослідження проведені на експериментальній установці, яка є двострічковою сушильною камерою, оснащеною ІЧ джерелами випромінювання та апаратно-програмним комплексом управління режимами роботи – «Контроль і регулювання температури ІЧ сушіння зернових».

Регулювання параметрів відбувалося за двома контурами. Вхідними параметрами, що регулюються є:

- кількість ІЧ випромінювання, що підводиться до зернової маси від установки «Квірін» – енергія випромінювання (E) (для серії експериментів без конвекції);
- кількість сушильного агента (теплого повітря) для серії експериментів, у яких була конвекція.

Недолік гнучкості в реконфігуруванні СППЧСЗ – одна з основних проблем подальшого розвитку комп'ютерних систем в агропромисловому комплексі. На додавання до системи зовнішніх швидкісних периферійних пристроїв накладаються певні обмеження через невеликі можливості портів комп'ютера, що входить до складу комплексу СППЧСЗ.

У процесі експериментальних досліджень для експериментальної сушильної камери розроблено пристрої для зняття основних параметрів зернової маси в процесі сушіння – USB термометри. Ці пристрої, що вимірювали температуру зерна, а в деяких експериментів і сушильного агента, виводили отримані дані на екран комп'ютера по USB-роз'єму якого вони були підключені. У цих пристроях програмно реалізована схема низькошвидкісного USB для зв'язку з ПК пульта керування стенда.

Метою експериментального аналізу апаратно-програмної частини сушильної камери (АПЧСК) є дослідження системи управління режимами джерела ІЧ сушіння, виявлення та розгляд властивостей, що мають негативний вплив на працездатність системи в цілому, або вилучення цих властивостей, чи зменшення їх негативного впливу.

У кожній серії проведено три досліди: при температурі ІЧ нагрівачів $T_p = 303...373$ К в експериментах із сушінням тільки за рахунок підведення променистої енергії та при постійній температурі підготовленого повітря $T_v = 303...313$ К і $T_p = 323...363$ К. Експерименти проведені за початкової вологості зерна в діапазоні – 20-22 %.

Таблиця 1

Основні режими експериментальних досліджень (ІЧ сушка)

№ Експерименту	Параметри									
	T_p, K (X_1)	T_{z_0}, K	T_{z_k}, K	T_0, K	$Y_0, \%$	$Y_{z_0}, \%$	$Y_{z_k}, \%$	$V \cdot 10^{-3},$ м/с	$\tau_e, \text{ХВИЛ}$ (X_3)	$x, \text{ММ}$ (X_2)
1	303-333	292-295	310-330	288-298	38-45	20,8-20,4	16,1-14,7	0,5-1	0-60	5-6
2	313-343	292-295	310-335	288-298	40-47	20,9-20,5	14,5-14,1	0,5-1	0-45	5-6
3	323-353	292-295	320-345	288-298	41-49	20,7-20,6	14,3-13,9	0,5-1	0-40	6-8
4	333-363	292-295	328-348	288-298	36-42	21,2-20,9	13,9-13,8	0,5-1	0-30	6-8
5	343-373	292-295	343-353	288-298	38-44	21,4-20,6	13,9-13,6	0,5-1	0-30	8-10

Грунтуючись на аналізі науково-технічної літератури та результатів, одержаних під час попередніх практичних досліджень на працюючій установці, вибрано повний факторний експеримент за методикою активного планування, що дозволяє реалізувати можливі комбінації трьох незалежних повністю керованих факторів: температура джерела ІЧ випромінювання сушильної установки (X_1) 303-353; товщина зернового шару (X_2) 5-12 мм; час випромінювання (X_3) 20-60 хв. Вихідні параметри: температура поверхні зернового шару і кількість поглиненої променистої енергії від ІЧ випромінювання. Базові режими сушіння зерна відображені в таблицях 1, 2.

Також важливим завданням експериментальної АПЧСК є забезпечення оптимальних технологічних температур сушіння зерна методом управління ІЧ випромінювачами в технологічних зонах сушіння. Крім того, до завдань експериментальних дослідів увійшли – вивірка теоретичних положень оптимального процесу ІЧ сушіння зерна, виявлення низки параметрів зерна й удосконалення програмної складової АПЧСК.

Таблиця 2

*Основні режими експериментальних досліджень
(ІЧ сушка + конвективний теплообмін)*

№ Експерименту	Параметри										
	T_p, K (X1)	T_{z_0}, K	T_{z_k}, K	T_0, K	$Y_0, \%$	$Y_{z_0}, \%$	$Y_{z_k}, \%$	$V \cdot 10^{-3},$ м/с	$\tau_e,$ хвиль (X3)	$x, мм$ (X2)	$V_e,$ м/с
1	303-323	292-295	310-330	288-298	39-44	20,7-20,4	15,7-14,5	0,5-1	0-60	5-8	2-5
2	313-333	292-295	310-335	288-298	42-49	20,6-20,5	14,2-14,0	0,5-1	0-45	5-8	2-5
3	323-343	292-295	320-345	288-298	42-47	20,7-20,6	14,0-13,8	0,5-1	0-40	8-10	2-5
4	333-353	292-295	328-348	288-298	40-45	20,9-20,5	13,8-13,7	0,5-1	0-30	8-10	2-5
5	343-353	292-295	343-353	288-298	45-49	21,7-21,1	13,7-13,6	0,5-1	0-30	10-12	2-5

Основні результати досліджень, отримані при проведенні натурного експерименту на стенді, з використанням апаратно-програмного комплексу управління процесом ІЧ сушіння зерна представлені в таблицях 3, 4, а також на рис. 4.

Таблиця 3

Результати експериментальних досліджень

№ Експерименту	Параметри					
	Керовані фактори			Функція відгуку		
	T_p, K (X1)	$x, мм$ (X2)	$\tau_e, хвиль$ (X3)	T_{z_k}, K	$Y_{z_k}, \%$	$\Delta Y_{z_k}, \%$
1	303-333	5-8	60	300-330	16,1-14,7	3,9-5,3
2	313-343	5-8	45	309-341	14,5-14,1	6-6,4
3	323-353	8-10	40	321-352	14,3-13,9	6,2-6,6
4	333-363	8-10	30	331-361	13,9-13,8	6,6-6,7
5	343-373	10-12	30	342-370	13,9-13,6	6,85-7,25

Таблиця 4

Результати експериментальних досліджень

№ Експерименту	Параметри						
	Керовані фактори				Додатковий фактор	Функція відгуку	
	T_p, K (X1)	$x, мм$ (X2)	$\tau_e, хвиль$ (X3)	$V_e, м/с$		T_{z_k}, K	$Y_{z_k}, \%$
1	303-333	5-8	60	2-5	301-328	15,7-14,5	5,5-6,7
2	313-343	5-8	45	2-5	307-339	14,2-14,0	6,3-6,5
3	323-353	8-10	40	2-5	318-349	14,0-13,8	6,8-7,0
4	333-363	8-10	30	2-5	327-358	13,8-13,7	6,95-7,05
5	343-373	10-12	30	2-5	339-367	13,7-13,6	7,1-7,2

Для всіх серій експериментів характерно, що зі збільшенням температури ІЧ джерела випромінювання температура зернового шару безперервно збільшується, що пов'язано зі зменшенням кількості вологи в зерні. При цьому зі збільшенням робочої температури ІЧ джерел до $T_p = 343-353 K$, вихід на оптимальну температуру зернової маси $T_z = 333-368 K$ проходить на 15-18 хвилин швидше, що, у свою чергу, скорочує загальний час сушіння приблизно на 35-45 %.

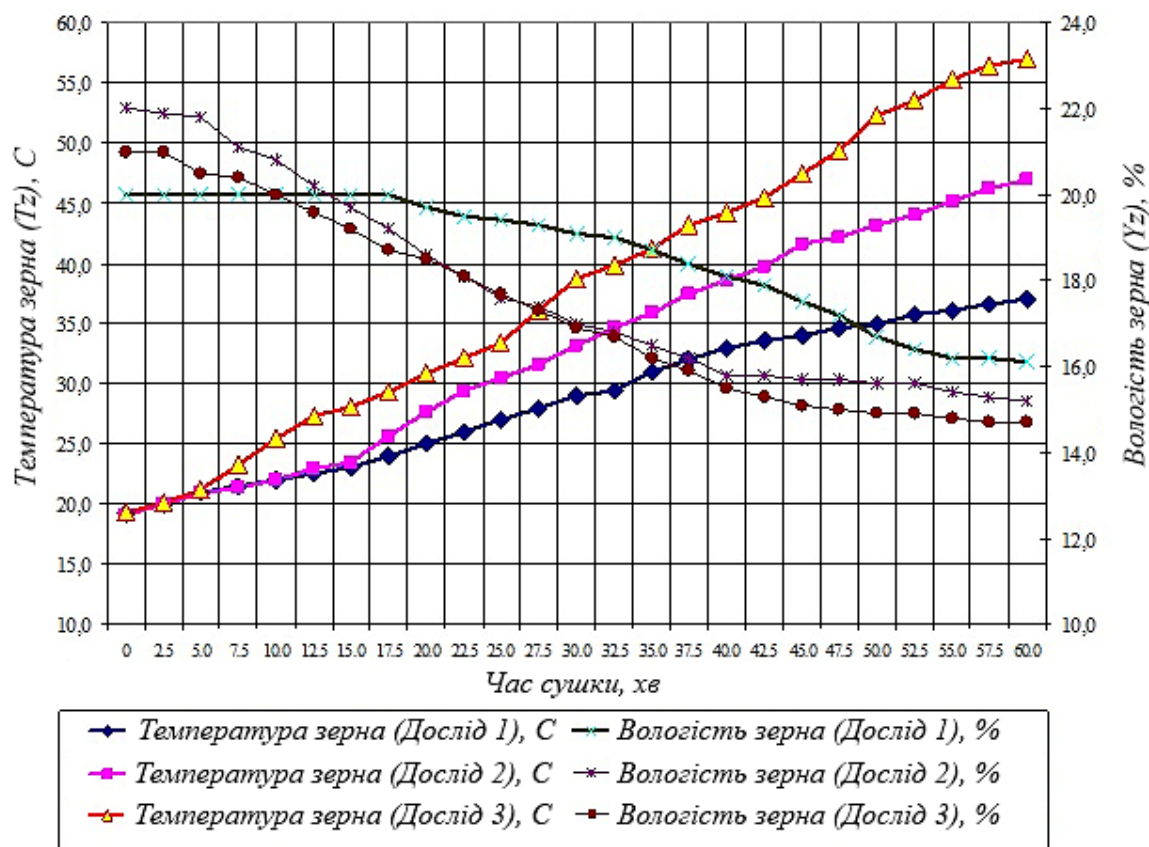


Рис. 4. Залежність температури зерна від часу сушки (експеримент 1 – ІЧ підвід теплоти)

Джерело: розроблено авторами.

Була розроблена комп'ютерна система управління ІЧ сушінням, що дозволяє вибрати та розрахувати раціональні параметри процесу з урахуванням особливостей зернового матеріалу.

У СППЧСЗ передбачено введення у спеціальні вікна, теплофізичних параметрів – початкової температури та вологості продукту сушіння, а також виведення на друк отриманих результатів: зміна температури та вологості зерна, підбір технологічних режимів, при якому продукти сушіння будуть мати харчову та біологічну цінність відповідно до максимального значення функціоналу якості.

На рис. 5 показана форма модуля математичного моделювання процесу прогнозування оцінки часу сушіння при заданих початкових параметрах зерна. Слід зазначити, що недостатня інформаційна підтримка цього завдання, а також питань поєднання існуючих інформаційних систем підприємств із заготівлі та переробки зернових різко знижує можливість оптимального вибору конкретного варіанта ІЧ сушіння та збільшує терміни адаптації технологічного обладнання до конкретних умов середовища функціонування підприємства.

Тому в межах розробки модуля СППЧСЗ та програми «System of automatic grain infrared drying» розроблено та створено таблиці БД з біологічними параметрами матеріалу сушіння. Це дозволило більш точно прогнозувати час виконання операцій залежно від таких факторів, як коефіцієнти теплопередачі та тепловіддачі різних сортів зернових, вміст у них білка та клейковини та ін.

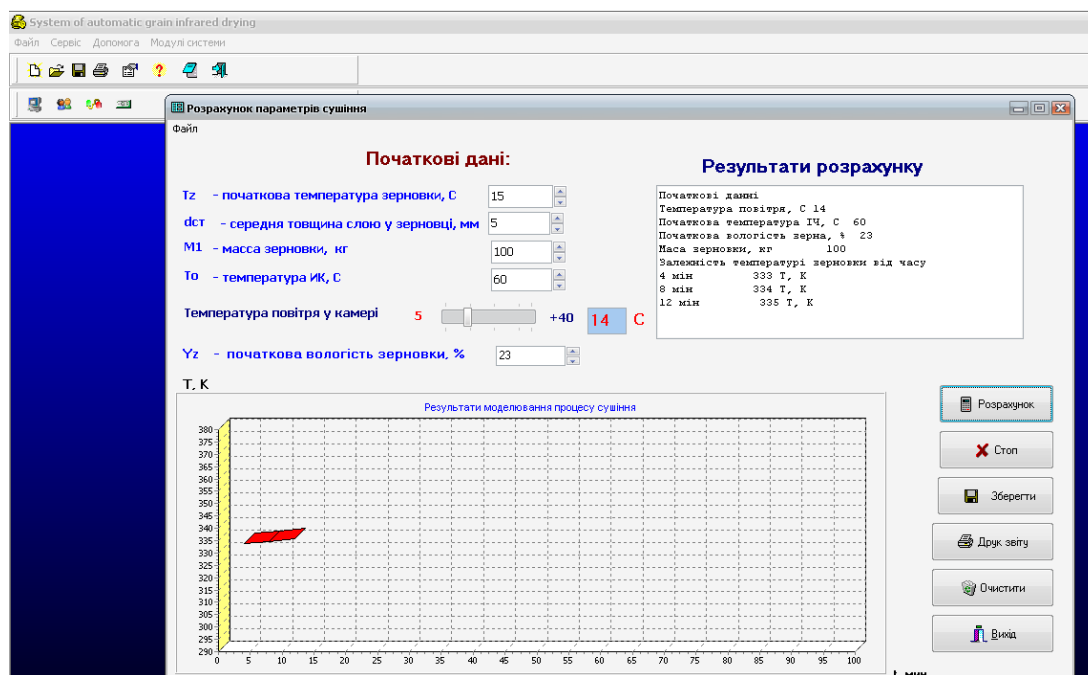


Рис. 5. Інтерфейс модуля математичного моделювання процесу і прогнозування часу сушки при заданих початкових параметрах зернової маси

Висновки. У статті розглянуто науково-ужиткове завдання підтримки прийняття рішень управління ІЧ сушінням зерна із застосуванням інформаційних технологій. Отримані результати досліджень дозволяють зробити такі висновки, основні з яких полягають у наступному:

1. Розроблено математичну модель ІЧ сушіння зерна. Отримано системи диференціальних рівнянь процесу сушіння колоїдних капілярно-пористих тіл при односторонньому та двосторонньому підведенні теплоти.

2. Визначено алгоритм розрахунку щільності падаючого теплового потоку, а також визначення температур для кожного шару при ІЧ сушінні зерна.

3. Визначено раціональну товщину (5...7 мм), що дозволяє забезпечити найбільш рівномірний розподіл температури поверхні ІЧ установки. Виявлено температури джерела, необхідні для найбільшого поглинання променистої енергії зерном. Встановлено робочі температури ІЧ джерел $T_p = 343\text{--}353\text{ K}$, при яких швидший вихід на оптимальну температуру зернової маси $T_z = 333\text{--}368\text{ K}$ скорочує загальний час сушіння на 35-45 % для варіанта використання лише ІЧ джерелом, та 40-50 % для комбінованого сушіння. Встановлено області значень вологості ($> 23\%$), за яких знижуються значення коефіцієнта температуропровідності. Також встановлено значення вологості, за яких швидкість зміни температури не зменшується (20-23 %), а зростає лише тепловий потік у зерновій масі. Встановлено підвищені питомі витрати теплоти на випаровування вологи для варіанта ІЧ сушіння з конвективною складовою.

4. Виконано оцінку різних варіантів сушіння з використанням коефіцієнтів ефективності нагріву K_t та ефективності вологознімання K_w за допомогою якої встановлено, що для всіх проведених серій експериментів з комбінованим підведенням теплоти (ІЧ + конвективна складова), час сушіння, порівняно тільки з ІЧ варіантом, скорочується на 32-39 %. Встановлено скорочення часу сушіння від 32 до 39 % для всіх проведених серій експериментів з комбінованим підведенням теплоти (ІЧ + конвективна складова) порівняно тільки з ІЧ підведенням. Крім того, виявлено конвективний вплив на динаміку процесу випаровування вологи із зерна різної товщини шару.

5. Розроблено та апробовано систему контролю, вимірювання та реєстрації параметрів ІЧ сушіння, які визначаються сучасними апаратними засобами та сучасними інформаційними технологіями.

Список використаних джерел

1. Цугленок Н. В. Функциональное описание процесса сушки зерна / Н. В. Цугленок // Вестник КрасГАУ. – 2005. – № 8. – С. 217–221.
2. Влияние ИК-обработки зерна пшеницы и ржи на параметры процесса его измельчения / Л. Н. Крикунова, Т. В. Андриенко, В. Я. Черных, А. В. Лебедев // Известия вузов. Пищевая технология. – 2007. – № 4. – С. 76-77.
3. Цугленок Н. В., Манасян С. К., Демский С. К. Техника и технология сушки зерна : учебное пособие / [Н. В. Цугленок, С. К. Манасян, Н. В. Демский]. – Красноярск : Краснояр. гос. аграр. ун-т, 2007. – 119 с.
4. Анисимов А. В. Система автоматического управления температурой и влажностью при подготовке зерна к помолу / А. В. Анисимов // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. НИ Вавилова. – 2013. – № 10. – С. 44-47.
5. Исследование температурного поля инфракрасной нагревательной системы для сушки зародышей зерна пшеницы и ржаных отрубей / С. Ф. Демидов, Б. А. Вороненко, С. С. Беляева, В. И. Марченко // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». – 2013. – № 2. – С. 384-396.
6. Калініченко Р. А. Математичне моделювання тепломасообмінних процесів високотемпературної термообробки зернових матеріалів / Р. А. Калініченко, В. Д. Войтюк // Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. –2017. – Вип. 275. – С. 59–67.
7. Лахно В. А. Использование компьютерных систем для повышения эффективности информационной поддержки инфракрасной сушки зерна : монография / В. А. Лахно, Д. А. Ширяев; Луган. нац. аграр. ун-т. – Луганск : Элтон-2, 2011. - 154 с.
8. Матус Ю. В. Інформаційна підтримка технологічного процесу інфрачервоного сушіння зерна / Ю. В. Матус, В. А. Лахно, Т. Ю. Осіпова // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – 2019. – № 7(255). – С. 43-49.
9. Проничев С. А. Автоматическое регулирование температурных режимов при ИК-сушке семенного зерна / С. А. Проничев // Хранение и переработка сельскохозяйственного сырья. – 2006. – № 1. – С. 52-53.

References

1. Tsuglenok, N.V. (2005). Funktsionalnoe opisaniye protsessya sushki zerna [Functional description of the grain drying process]. *Vestnik KrasGAU – Vestnik KrasGAU*, (8), 217–221.
2. Krikunova, L.N., Andrienko, T.V., Chernykh, V.Ia., & Lebedev, A.V. (2007). Vliyanie IK-obrabotki zerna pshenitsy i rzhi na parametry protsessya ego izmelcheniya [Effect of IR treatment of wheat and rye grain on the parameters of its grinding process]. *Izvestiya vuzov. Pishchevaia tekhnologiya – News of higher educational institutions. Food technology*, (4), 76-77.
3. Tsuglenok, N.V., Manasian, S.K., & Demskii, S.K. (2007). *Tekhnika i tekhnologiya sushki zerna [Technique and technology of grain drying]*. Krasnoiar. gos. agrar. un-t.
4. Anisimov, A.V. (2013). Sistema avtomaticheskogo upravleniya temperaturoi i vlazhnosti pri podgotovke zerna k pomolu [Automatic control system for temperature and humidity in the preparation of grain for grinding]. *Vestnik Saratovskogo gosagrouniversiteta im. N.I. Vavilova – Bulletin of the Saratov State Agrarian University N.I. Vavilov*, (10), 44-47.
5. Demydov, S.F., Voronenko, B.A., Belyaeva, S.S., & Marchenko, V.Y. (2013). Issledovanie temperaturnogo polya infrakrasnoi nagrevatelnoi sistemy dlia sushki zarodyshei zerna pshenitsy i rzhanykh otrubei [Investigation of the temperature field of an infrared heating system for drying wheat germ germs]. *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya «Protcessy i apparaty pishchevykh proizvodstv» – Scientific Journal of the ITMO Research Institute. Series «Processes and devices of food production»*, (2), 384-396.
6. Kalinichenko, R.A., & Voitiuk, V.D. (2017). Matematichne modeliuvannia teplomasoobminnikh protcesiv visokotemperaturnoi termoobrobki zernovikh materialiv [Mathematical modeling of heat and mass transfer processes of high-temperature heat treatment of grain materials]. *Naukovyi visnyk NUBiP Ukrainy. Seriya: Tekhnika ta energetika – Scientific Bulletin of NULES of Ukraine. Series: Engineering and energy of agro-industrial complex*, 275, 59-67.

7. Shiriaev, D.A., & Lakhno, V.A. (2011). *Ispolzovanie kompiuternykh sistem dlia povysheniia effektivnosti informatcionnoi podderzhki infrakrasnoi sushki zerna* [The use of computer systems to improve the efficiency of information support for infrared drying of grain]. Elton-2.

8. Matus, Y.V., Lakhno, V.A., Osipova, T.Iu. (2019). Informatsiina pidtrimka tekhnologichnoho protcesu infrachervonoho sushinnia zerna [Information support of the technological process of infrared grain drying]. *Visnik Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universitetu im. Volodimira Dalia – Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, (7(255)), 43-49.

9. Pronichev, S.A. (2006). Avtomaticheskoe regulirovanie temperaturnykh rezhimov pri IK-sushke semennogo zerna [Automatic control of temperature regimes during IR drying of seed grain]. *Khranenie i pererabotka selkhozsyria – Storage and processing of agricultural raw materials*, (1), 52-53.

Отримано 25.11.2021

UDC 004[66.04:631.563.2]

Yurii Matus,¹ Tetiana Osypova², Boris Gusev³, Sahun Andrii⁴

¹Senior Lecturer of the Department of Computer Systems, Networks and Cybersecurity
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
E-mail: umatus@nubip.edu.ua. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-0974-4789>

²PhD in Pedagogical Sciences, Associate Professor of the Department of Computer Systems, Networks and Cybersecurity
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
E-mail: t_osipova@nubip.edu.ua. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-9199-3436>

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Computer Systems, Networks and Cybersecurity
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
E-mail: gusevbs@nubip.edu.ua. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-1658-7822>

⁴PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Computer Systems, Networks and Cybersecurity
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
E-mail: a.sagun@nubip.edu.ua. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-5151-9203>

INFORMATION TECHNOLOGIES FOR DECISION SUPPORT SYSTEMS ON INFRARED GRAIN DEHYDRATION

Rapid growth of information technologies causes the changes in many production processes. The effectiveness of electrotechnical means of infrared radiation is due to the application of new, scientifically grounded methods and means of energy supply control using controllers and personal computers, new information technologies and systems.

Therefore, there is a need for further mathematical models development as well as information technology used in decision support systems on infrared grain drying from elevators and granaries.

Research and publication analysis on information support questions of grain drying based on infrared radiation technology has shown that the issues of information support systems are currently underexplored in scientific literature.

The goal of this research is mathematical modeling of the IR grain drying process and information support development of the drying process, taking into account the obtained mathematical model.

The improved model of the infrared drying process for grain crops is proposed, which, in contrast to the existing ones, is focused on application in decision support systems when organizing the drying process. The results of the experiments proved that infrared radiation use contributes to the intensification of the grain drying process due to a significant heat flux rate increasing on the material's irradiated surface and the of infrared rays' penetration into material. It has been proved that modern information technology, rational schemes and operating parameters of infrared grain drying processes utilization will reduce dehydration time with "gentle" drying modes to ensure the required quality parameters of the product.

In this work it was first proposed to abandon probabilistic models of grain flow behavior under IR irradiation. A new mathematical model has been proposed based on information about the characteristics of the heat flow, dehydration and grain mass' condition. This will significantly improve the IR grain drying process and get a higher quality product.

Keywords: drying; infrared; grain; computer systems, mathematical model; heat flux.

Fig.: 5. Table: 4. References: 9.