

УДК 621.9.048; 664.002.5

DOI: 10.15587/1729-4061.2018.139314

Теоретичне обґрунтування та ідентифікація процесів тепломасообміну у вібраційній сушарці з ІЧ-енергопідведенням

В. М. Бандура, Р. А. Калініченко, Б. І. Котов, А. В. Спірін

Теоретично обґрунтовано процеси радіаційно-конвективного тепломасообміну між усіма визначальними об'єктами всередині вібраційної сушарки з ІЧ-енергопідведенням. На основі теплового і матеріального балансів визначено рівняння, які описують основні динамічні характеристики режиму сушіння олієвмісного зернового матеріалу в безперервно діючій ІЧ-сушарці. У зв'язку з тим, що точного аналітичного розв'язку представленої математичної моделі у вигляді системи диференціальних рівнянь у частинних похідних не існує. Запропоноване наближене рішення дозволяє ідентифікувати залежності розподілу температури і вологовмісту зернового та олієвмісного матеріалу за довжиною сушарки для будь-якого моменту часу.

Чисельний розв'язок наведеної математичної моделі можливий лише при наявності визначених взаємопов'язаних кінетичних коефіцієнтів. Кінетичні коефіцієнти експериментально прямими вимірами знайти не можливо, тому у статті запропоновано метод подолання цих труднощів. На основі представленого наближеного аналітичного розв'язку синтезованої математичної моделі, з використанням методу обернених задач визначаються комплекси коефіцієнтів за результатами експериментальної ідентифікації процесу зневоднення. В подальшому експериментально ідентифіковані параметричні комплекси моделі можливо використовувати при аналізі процесу сушіння на наближених розв'язках або для подальшого точного чисельного розв'язку.

На основі експериментальних досліджень зневоднення зерноматеріалу встановлено, що при збільшенні потужності ІЧ-джерела від 400 до 500Вт час сушіння з початкової вологості матеріалу 11 % до 8,75 % зменшується з 9 до 7 хвилин. Визначено, що критерій Ребіндера, який характеризує вологотеплові характеристики матеріалу, зменшується при зменшенні його вологості з величини 0,04 при 11 % до 0,01 при 9 %. Це є цікавим з практичної точки зору і дає можливість використовувати отримані результати і математичну модель при енергетичному удосконаленні реалізації процесів термічного сушіння в типових об'єктах підготовки до переробки олієвмісних зерноматеріалів

Ключові слова: тепломасообмін, інфрачервоне енергопідведення, вібраційна сушарка, олієвмісне зерно, параметрична ідентифікація

1. Вступ

Близько 15 % від усього споживання енергії в агропромисловому комплексі розвинених країн припадає на процеси сушіння і термічної обробки

сільськогосподарських матеріалів [1]. Потенційно найбільш енерго-ефективними є сушарки з ІЧ-енергопідведенням за рахунок дії радіаційної енергії безпосередньо на вологу у висушуємому матеріалі і зменшенням втрат з відпрацьованим сушильним агентом. В Україні ж більшість наявних в господарствах сушарок і установок для високоінтенсивної термообробки зернових матеріалів з інфрачервоним (ІЧ) енергопідведенням мають завищені питомі витрати енергії на одиницю отриманого продукту [2, 3].

Питання впровадження інноваційних рішень, що спрямовані на зменшення питомих витрат енергії обладнанням з ІЧ-енергопідведенням для підготовки зернових матеріалів до зберігання або до переробки, споживання чи до згодовування, надзвичайно важливі. Вирішення ускладнюється відсутністю уніфікованих підходів до синтезу математичної моделі тепломасообмінних процесів і мінливістю взаємопов'язаних кінетичних коефіцієнтів, що залежать від фізичних властивостей взаємодіючих речовин і енергій, в аналітичних моделях.

Оптимальне проведення процесу зневоднення матеріалу у сушарках з ІЧ-енергопідведенням за критеріями енергоефективності і якості кінцевого продукту неможливе без адекватної математичної моделі. Тому актуальними слід вважати дослідження, що спрямовані на подальшу розробку і удосконалення математичного апарату, що характеризує тепломасообмінні процеси у зазначених сушарках.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Вирішення задач обґрунтування раціональних режимів і параметрів обладнання для ІЧ-термообробки ґрунтується на використанні математичних моделей теорії тепло-масообміну. А також, на фізичних законах, фізико-хімічних балансових співвідношеннях, узагальненні експериментальних даних – на основі теорії подібності, ймовірності і математичної статистики [4, 5].

Класичні математичні моделі теорії тепло-масообміну [6] є найбільш універсальними для різних видів волого і тепло переносу. Але громіздкі аналітичні рішення справедливі лише для постійних коефіцієнтів, спрощеної зовнішньої форми матеріалу (необмежена пластина, куля, циліндр), однозначно визначених граничних умов. Це можливо лише при повільному проведенні процесу, або в межах достатньо малих зон, на які розбивається об'єм вологого продукту. Основні емпіричні математичні моделі зневоднення зернового матеріалу, які використовуються для опису тепломасообміну в зерновому матеріалі, представлені в [7]. Але вони розглянуті лише для конвективного способу підведення теплоти і застосовні лише в діапазоні досліджуваних значень параметрів.

Тому для інженерного розрахунку кінетики нагріву і зневоднення вологих дисперсних матеріалів використовують наближені методи, розроблені при наближених припущеннях для конкретних систем з урахуванням гідродинамічного становища в апараті [8, 9]. Так, зокрема, у роботах [10, 11] на основі балансових рівнянь тепло і масообміну досліджується кінетика нагріву у сушіння зернового матеріалу при постійному або періодичному ІЧ-енергопідведенні. Однак в роботах [10, 11] для спрощення аналітичних

розрахунків при складанні балансових співвідношень розглядаються не всі взаємодіючі об'єкти, між якими відбувається комбінований теплообмін.

Розв'язок моделей у вигляді системи диференціальних рівнянь в частинних похідних методом сіток або в математичному комп'ютерному пакеті представлений в роботах [12, 13]. Дозволяє визначати тривалість процесу, поля вологості та температури зернової маси і сушильного агенту у шарі в часі для різних режимів сушіння зерноматеріалу. Однак слід зазначити, що чисельне моделювання завжди носить частинний характер (результат адекватний тільки при визначених умовах), що утруднює використання результатів отриманих на математичній моделі.

В свою чергу, визначення кінетичних коефіцієнтів теплообміну і вологообміну, що входять у рівняння математичних моделей, надзвичайно складна задача. *Це пов'язано з тим, що* коефіцієнти залежать від багатьох визначальних параметрів і умов проведення процесу, і прямими вимірами отримати неможливо.

Значення теплофізичних і масообмінних коефіцієнтів мають досить великі розходження в різних довідкових джерелах, кількість яких обмежена. Зазвичай для наближеного визначення коефіцієнтів використовують емпіричні залежності для теплового і дифузійного числа Нусельта, що отримані на основі узагальнення великої кількості експериментальних досліджень [14]. Тому є підстави вважати, що недостатня визначеність зазначених коефіцієнтів може призводити до неточностей в результатах моделювання.

В роботі [15] доведена доцільність використання методу обернених задач теорії тепломасопровідності. Метод обернених задач дозволяє за експериментально визначеними температурами в декількох точках всередині тіла або шару матеріалу і по його середньому вологовмісту визначити комплекси коефіцієнтів, що входять в розв'язки диференціальних рівнянь [16]. І в подальшому чисельно або аналітично відтворювати поля температур і вологовмісту зерноматеріалу. Але використання цього методу потребує хоча б наближеного розв'язку складної математичної моделі процесів і орієнтовних значень комплексів коефіцієнтів, що визначаються.

Проблемою теоретичного обґрунтування процесів тепло- масообміну в сушильних установках є складність вибору між точними, але обмеженими у застосуванні емпіричними моделями процесів або універсальними аналітичними моделями з недостатньо визначеними кінетичними коефіцієнтами. Тому перспективними є дослідження, в яких використовуються теоретико-експериментальні підходи, що розвивають універсальність аналітичних моделей і адекватність емпіричних залежностей для обґрунтування параметрів і режимів роботи тепломасообмінних апаратів, синтезу систем оптимального управління.

3. Мета та задачі дослідження

Метою даної роботи є дослідження теоретико-експериментальними методами комбінованого процесу сушіння у вібраційній сушарці при ІЧ-енергопідведенні, для її подальшого удосконалення.

Відповідно до поставленої мети необхідно було вирішити такі задачі:

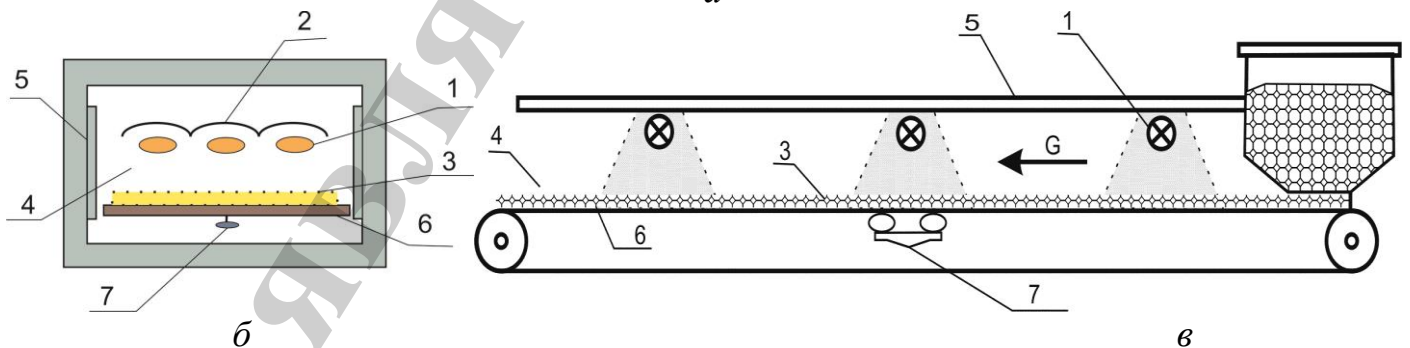
- розробити аналітичну математичну модель тепломасообмінних процесів у вібраційній сушарці з ІЧ-енергопідведенням, що враховує всі взаємодіючі поверхні об'єктів всередині сушарки і отримати її наближений розв'язок;
- експериментально визначити кінетику нагріву і зневоднення шару зерноматеріалу (ріпаку);
- використовуючи метод обернених задач, ідентифікувати параметричні комплекси, що входять в розв'язки аналітичної моделі за результатами експериментальних досліджень сушіння зерна ріпаку.

4. Розробка математичної моделі процесу термічного зневоднення при ІЧ-енергопідведенні

Розглянемо експериментальну установку власної розробки, що являє собою віброуючу поверхню вздовж якої переміщується зерновий матеріал, з якого видаляється волога за рахунок теплової енергії, що передається випромінюванням від інфрачервоних (ІЧ) випромінювачів рис. 1.



a



б

в

Рис. 1. Експериментальна інфрачервона сушарка: *a* – зовнішній вигляд; *б* – розрахункова схема; *в* – технологічна схема: 1 – ІЧ-нагрівач; 2 – екран; 3 – віброзріджений шар зерна; 4 – сушительний агент – повітря; 5 – бокові екрани; 6 – транспортер; 7 – віброзбуджувач

Випромінювачі розміщені паралельно шару матеріалу вздовж усієї вібротранспортуючої поверхні. Для створення спрямованого потоку над випромінювачами розміщено екранний відбивач, а бокова поверхня сушарки екранована вертикальними поверхнями. Матеріал переміщується у віброзв'язаному стані за рахунок вібрацій опорної поверхні-стрічки транспортера. При цьому матеріал сприймає енергію ІЧ-випромінювання що частково поглинається, а частково відбивається, а також конвекцією передається повітрю і оточуючим поверхням. Теплова енергія отримана матеріалом витрачається на нагрівання вологого матеріалу (збільшення його ентальпії), випаровування вологи і віддається в оточуюче середовище: повітря, бокові екрани, стрічку транспортера. При цьому теплота від матеріалу передається як випромінюванням так і конвекцією. Кондуктивна складова теплопереносу до віброуючої поверхні незрівнянно мала відносно конвективної і радіаційної складових. В процесі роботи сушарки матеріал безперервно переміщується від місця завантаження до місця вивантаження нагріваючись і зневоднюючись. Повітря переміщується між стрічкою з матеріалом і джерелами випромінювання.

З метою спрощення аналізу даного процесу приймемо наступні загальноприйняті при математичному описі [10, 11] припущення:

– теплофізичні параметри матеріалу і повітря від температури не залежать і в першому наближенні приймаються середніми за процес;

– градієнти температури і вологовмісту за розміром частинок зернового матеріалу не враховуються (нагрів і зневоднення в окремих зернах безградієнтні);

– температура стрічки, екранів, випромінювачів однакові за довжиною і в поперечному перерізі апарату (сушарки);

– кількість вологи, що видаляється з матеріалу, пропорційна вологовмісту, а коефіцієнт пропорційності залежить від температури лінійно.

Відповідно до наведеного опису і зроблених припущень напишемо рівняння теплового і матеріального балансів за час dt на відрізку dy в напрямку руху шару зернового матеріалу у загальному вигляді:

$$dQ_0 = dQ_1 + dQ_{12} + dQ_{13} \pm dQ_{14} + dQ_{15}; \quad (1)$$

$$dQ_{12} = dQ_2 + dQ_{23} + dQ_{24} + dQ_{25}; \quad (2)$$

$$dQ_{13} + dQ_{14} = dQ_3 + dQ_{34} + dQ_{35} + dQ_w; \quad (3)$$

$$dQ_{35} = dQ_5 + dQ_{34}; \quad (4)$$

$$dQ_4 = dQ_{14} + dQ_{24} + dQ_{54} \pm dQ_{34}; \quad (5)$$

$$dQ_{36} = dQ_6 + dQ_{64}; \quad (6)$$

$$dM_4 = -dM_3, \quad (7)$$

де dQ_0 – енергія, яку виділяє ІЧ-випромінювач, Дж; $dQ_1, dQ_2, dQ_3, dQ_4, dQ_5, dQ_6$ – енергія, що витрачається на нагрівання елементів установки, відповідно: випромінювача (лампа, ТЕН), відбивного екрану, матеріалу, повітря, бокових екранів, транспортуючого засобу, Дж; $dQ_{12}, dQ_{13}, dQ_{15}, dQ_{25}, dQ_{23}, dQ_{58}$ – енергія, що передається випромінюванням, від поверхні одного елемента до іншого, відповідно до індексів, Дж; $dQ_{14}, dQ_{24}, dQ_{34}, dQ_{36}, dQ_{54}, dQ_{64}$ – енергія, що передаються конвективним (або складним) теплообміном від одного елемента до іншого, Дж; dQ_w – енергія, що поглинута матеріалом і витрачається на випаровування вологи з нього, Дж; M – маса вологи, кг.

Визначивши значення окремих складових теплового і матеріального балансу через відомі співвідношення [10, 11] можна записати систему диференціальних рівнянь (як математичну модель) в розгорнутому вигляді:

$$P = m_1 c_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial \tau} + c_{12} F_{12} (T_1^4 - T_2^4) + c_{13} F_{13} (T_1^4 - T_3^4) + c_{15} F_{15} (T_1^4 - T_5^4) + \alpha'_{14} F_1 (\theta_1 - t); \quad (8)$$

$$c_{12} F_{12} (T_1^4 - T_2^4) = m_2 c_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial \tau} + c_{25} F_{25} (T_2^4 - T_5^4) + c_{23} F_{23} (T_2^4 - T_3^4) + \alpha'_{24} F_2 (\theta_2 - t); \quad (9)$$

$$A_\lambda \left[c_{13} F_{13} (T_1^4 - T_3^4) + c_{23} F_{23} (T_2^4 - T_3^4) \right] = m_3 c_3 \frac{\partial \theta_3}{\partial \tau} + G_3 c_3 L \frac{\partial \theta_3}{\partial y} + \alpha'_{34} F_{34} (\theta_3 - t) + \alpha_6 F_6 (\theta_3 - \theta_6) \pm c_{35} F_{35} (T_3^4 - T_5^4) + r \left[m_0 \frac{\partial U}{\partial \tau} + G_0 L \frac{\partial U}{\partial y} \right]; \quad (10)$$

$$m_p c_p \frac{\partial t}{\partial \tau} \pm G_p c_p L \frac{\partial t}{\partial y} = \alpha'_{14} F_1 (\theta_1 - t) + \alpha'_{24} F_2 (\theta_2 - t) + \alpha'_{34} F_3 (\theta_3 - t) + \alpha'_{54} F_5 (\theta_5 - t); \quad (11)$$

$$c_{15} F_{15} (T_1^4 - T_5^4) = m_5 c_5 \frac{\partial \theta_5}{\partial \tau} + \alpha'_{54} F_{54} (\theta_5 - t); \quad (12)$$

$$\alpha'_e F_6 (\theta_3 - \theta_6) = m_6 c_6 \frac{\partial \theta_6}{\partial \tau} + \alpha'_6 F_6 (\theta_6 - t'); \quad (13)$$

$$\frac{c_3}{Rb} \left(\frac{\partial \theta_3}{\partial \tau} + \frac{G_3 L}{m_3} \frac{\partial \theta_3}{\partial y} \right) = -r \left(\frac{\partial U}{\partial \tau} + \frac{G_4 L}{m_{30}} \frac{\partial U}{\partial y} \right); \quad (14)$$

$$-\left(m_3 \frac{\partial U}{\partial \tau} + G_3 L \frac{\partial U}{\partial y} \right) = m_4 G_4 \left(\frac{\partial d}{\partial \tau} + G_4 L \frac{\partial d}{\partial y} \right), \quad (15)$$

де індекси в позначеннях коефіцієнтів вказують на приналежність до об'єктів тепломасообміну відповідно до рис. 1, б; α'_{ij} – коефіцієнти складеного теплообміну, F_{ij} – поверхні, м²; T_i – температура джерела енергії, К; t – температура повітря, К; Q – температура матеріалу, що висушується К; C_{ij} – приведений коефіцієнт випромінювання; P – потужність випромінювача, Вт; L – довжина транспортера, м; m_i , G_i – маса об'єкту, та його витрати, кг, кг/с; m_i , c_i – теплоємність об'єктів, Дж/К; A_λ – коефіцієнт поглинання випромінювання; r – приведена теплота пароутворення, Дж/кг; Rb – критерій Ребіндера; U – вологовміст матеріалу, кг/кг.

Система може бути розв'язана числовим методом при заданих граничних умовах і числових значеннях коефіцієнтів, які розрахунками визначити досить складно. Для теоретичного аналізу теплових масообмінних процесів в існуючих комп'ютерних середовищах і отримання аналітичних розрахункових залежностей спростимо математичний опис нестационарних процесів.

Щільність радіаційного потоку від поверхні випромінювання до поглинальної поверхні можна представити [10, 11], у вигляді аналогічному виразу для конвективного теплообміну:

$$q_{\text{вип}} = c_{ij} \cdot 10^{-8} (T_1^4 - T_2^4) = \\ = c_{ij} \cdot 10^{-8} (T_1^2 - T_2^2)(T_1^2 + T_2^2) = \alpha'_{ij} (\theta_1 - \theta_2), \quad (16)$$

де $\alpha'_{ij} = c_{ij} \cdot 10^{-8} (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)$ – лінійний коефіцієнт теплообміну випромінюванням.

Лінеаризуючи радіаційні складові в рівняннях (8)–(10), (12) перепишемо рівняння у вигляді:

$$m_1 c_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial \tau} = P - \alpha_{12} F_{12} (\theta_1 - \theta_2) - \\ - \alpha_{13} F_{13} (\theta_1 - \theta_3) - \alpha_{15} F_{15} (\theta_1 - \theta_5) - \alpha'_{14} F_1 (\theta_1 - t); \quad (17)$$

$$m_2 c_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial \tau} = \alpha_{12} F_{12} (\theta_1 - \theta_2) - \\ - \alpha_{25} F_{25} (\theta_2 - \theta_5) - \alpha_{23} F_{23} (\theta_2 - \theta_3) - \alpha'_{24} F_2 (\theta_2 - t); \quad (18)$$

$$\begin{aligned}
& m_3 c_3 \frac{\partial \theta_3}{\partial \tau} + G_3 c_3 L \frac{\partial \theta_3}{\partial y} = \\
& = A_\lambda \cdot \left[\alpha_{13} F_{13} (\theta_1 - \theta_3) + \alpha_{23} F_{23} (\theta_2 - \theta_3) - \alpha'_{34} F_{34} (\theta_3 - t) - \right. \\
& \left. - \alpha'_e F_6 (\theta_3 - \theta_6) \pm \alpha_{35} F_{35} (\theta_3 - \theta_5) \right] + \\
& + r \left[m_0 \frac{\partial U}{\partial \tau} + G_0 L \frac{\partial U}{\partial y} \right];
\end{aligned} \tag{19}$$

$$\begin{aligned}
& m_p c_p \frac{\partial t}{\partial \tau} \pm G_p c_p L \frac{\partial t}{\partial y} = \alpha'_{14} F_1 (\theta_1 - t) + \\
& + \alpha'_{32} F_3 (\theta_3 - t) + \alpha'_{54} F_5 (\theta_5 - t) + \alpha'_{24} F_4 (\theta_2 - t);
\end{aligned} \tag{20}$$

$$m_5 c_5 \frac{\partial \theta_5}{\partial \tau} = \alpha_{15} F_{15} (\theta_1 - \theta_5) - \alpha'_{54} F_{54} (\theta_5 - t); \tag{21}$$

$$m_6 c_6 \frac{\partial \theta_6}{\partial \tau} = \alpha'_e F_6 (\theta_3 - \theta_6) - \alpha'_{36} F_{36} (\theta_6 - t'). \tag{22}$$

В рівнянні (19) замінимо останню складову, яка визначає кількість теплоти на випаровування вологи її тепловим аналогом з рівняння (14), отримаємо:

$$\begin{aligned}
& c_3 \left(m_3 - \frac{m_{30}}{Rb} \right) \frac{\partial \theta_3}{\partial \tau} + c_3 L \left(G_3 - \frac{G_{03}}{Rb} \right) \frac{\partial \theta_3}{\partial y} = \\
& = A_\lambda \left[\alpha_{13} F_{13} (\theta_1 - \theta_3) + \alpha_{23} F_{23} (\theta_2 - \theta_3) - \right. \\
& \left. - \alpha'_{34} F_{34} (\theta_3 - t) - \alpha'_e F_6 (\theta_3 - \theta_6) \pm \alpha_{35} F_{35} (\theta_3 - \theta_5) \right].
\end{aligned} \tag{23}$$

Для режиму, що встановився, похідні за часом в рівняннях (17)–(22) будуть рівними нулю. І матимемо систему рівнянь для стаціонарного режиму:

$$\begin{aligned}
& P = \alpha_{12} F_{12} (\theta_1 - \theta_2) + \alpha_{13} F_{13} (\theta_1 - \theta_3) + \\
& + \alpha_{15} F_{15} (\theta_1 - \theta_5) + \alpha'_{14} F_1 (\theta_1 - t);
\end{aligned} \tag{24}$$

$$\begin{aligned}
& \alpha_{12} F_{12} (\theta_1 - \theta_2) = \alpha_{25} F_{25} (\theta_2 - \theta_5) + \\
& + \alpha_{23} F_{23} (\theta_2 - \theta_3) + \alpha'_{24} F_2 (\theta_2 - t);
\end{aligned} \tag{25}$$

$$\alpha_{15} F_{15} (\theta_1 - \theta_5) = \alpha'_{54} F_{54} (\theta_5 - t); \tag{26}$$

$$\alpha_6 F_6 (\theta_{\diamond} - \theta_6) = \alpha'_{36} F_{36} (\theta_6 - t'); \quad (27)$$

$$\begin{aligned} c_3 L \left(G_3 - \frac{G_{03}}{Rb} \right) \frac{\partial \theta_3}{\partial y} = \\ = A_\lambda \left[\alpha_{13} F_{13} (\theta_1 - \theta_3) + \alpha_{23} F_{23} (\theta_2 - \theta_3) - \right. \\ \left. - \alpha'_{34} F_{34} (\theta_3 - t) - \alpha_e F_6 (\theta_3 - \theta_6) \pm \alpha_{35} F_{35} (\theta_3 - \theta_5) \right]; \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} G_p c_p L \frac{\partial t}{\partial y} = \alpha'_{14} F_1 (\theta_1 - t) + \alpha'_{32} F_3 (\theta_3 - t) + \\ + \alpha'_{54} F_5 (\theta_5 - t) + \alpha'_{24} F_4 (\theta_2 - t). \end{aligned} \quad (29)$$

З рівнянь (24)–(27) визначимо значення температури окремих елементів установки ($\theta_1, \theta_2, \theta_5, \theta_6$) через шукані значення t та θ_3 , отримаємо:

$$\theta_1 = k_1 \theta_3 + k_2 t; \quad (30)$$

$$\theta_2 = k_{31} \theta_3 + k_4 t; \quad (31)$$

$$\theta_5 = k_5 \theta_3 + k_6 t; \quad (32)$$

$$\theta_6 = k_7 \theta_3 + k_8 t', \quad (33)$$

де $k_1 \dots k_8$ – безрозмірні комплекси, що визначаються із конструктивних F_{ij} і режимних α_{ij} параметрів установки, що прийняти для розрахунків як сталі величини:

$$k_1 = \alpha_{13} F_{13} (\alpha_{12} F_{12} + \alpha'_{24} F_2 + \alpha_{25} F_{25}) (\alpha_{15} F_{15} + \alpha_{54} F_{54}) / K;$$

$$k_2 = \left(\alpha_{12} F_{12} (\alpha_{15} \alpha'_{14} F_{15} (F_1 + F_2) + \alpha_{54} (\alpha_{15} F_{15} + \alpha'_{14} (F_1 + F_2) + \alpha_{25} F_{25}) + F_{54}) + \right. \\ \left. + (\alpha_{\kappa-l} F_2 + \alpha_{25} F_{25}) (\alpha_{54} \alpha'_{14} F_1 F_{54} + \alpha_{15} F_{15} (\alpha'_{14} F_1 + \alpha_{54} F_{54})) \right) / K;$$

$$k_3 = \alpha_{13} F_{13} (\alpha_{15} \alpha_{25} F_{15} F_{25} + \alpha_{12} F_{12} (\alpha_{15} F_{15} + \alpha_{54} F_{54})) / K;$$

$$k_4 = \left(\alpha_{15} \alpha_{\kappa-l} F_{15} (\alpha'_{14} F_1 F_2 + \alpha_{13} F_{13} F_2 + \alpha_{12} F_{12} (F_1 + F_2) + \alpha_{25} F_1 F_{25}) + \alpha_{54} F_{54} \times \right. \\ \left. \times \left((\alpha_{\kappa-l} F_1 + \alpha_{13} F_{13} + \alpha_{15} F_{15}) (\alpha_{\kappa-l} F_2 + \alpha_{25} F_{25}) + \right. \right. \\ \left. \left. + \alpha_{12} F_{12} (\alpha_{15} F_{15} + \alpha'_{14} (F_1 + F_2) + \alpha_{25} F_{25}) \right) \right) / K;$$

$$k_5 = \alpha_{13}\alpha_{15}F_{13}F_{15}(\alpha_{12}F_{12} + \alpha_{\kappa-l}F_2 + \alpha_{25}F_{25}) / K;$$

$$k_6 = \left(\begin{aligned} &(\alpha_{\kappa-l}F_2 + \alpha_{25}F_{25})(\alpha_{15}\alpha'_{14}F_1F_{15} + \alpha_{54}F_{54}(\alpha_{\kappa-l}F_1 + \alpha_{13}F_{13} + \alpha_{15}F_{15})) + \alpha_{12}F_{12} \times \\ &\times (\alpha_{15}\alpha'_{14}F_{15}(F_1 + F_2) + \alpha_{54}F_{54}(\alpha_{13}F_{13} + \alpha_{15}F_{15} + \alpha_{14}(F_1 + F_2) + \alpha_{25}F_{25})) \end{aligned} \right) / K;$$

$$k_7 = \frac{\alpha_e F_6}{\alpha_e F_6 + \alpha_{36} F_{36}};$$

$$k_8 = \frac{\alpha_{36} F_{36}}{\alpha_e F_6 + \alpha_{36} F_{36}};$$

де

$$K = (\alpha_{\kappa-l}F_2 + \alpha_{25}F_{25}) \left(\begin{aligned} &\alpha_{54}F_{54}(\alpha'_{14}F_1 + \alpha_{13}F_{13}) + \\ &+ \alpha_{15}F_{15}(\alpha'_{14}F_1 + \alpha_{13}F_{13} + \alpha_{54}F_{54}) \end{aligned} \right) + \\ + \alpha_{12}F_{12} \left(\begin{aligned} &\alpha_{54}F_{54}(\alpha_{13}F_{13} + \alpha'_{14}(F_1 + F_2) + \alpha_{25}F_{25}) + \\ &+ \alpha_{15}F_{15}(\alpha_{13}F_{13} + \alpha'_{14}(F_1 + F_2) + \alpha_{54}F_{54}) \end{aligned} \right).$$

Підставляючи отримані значення (30)–(33) в рівняння (28) та (29) після відповідних перетворень матимемо систему двох взаємопов'язаних рівнянь:

$$\bar{G}_1 \frac{d\theta_3(y)}{dy} = t - a_1\theta_3 + b_1, \quad (34)$$

$$\bar{G}_2 \frac{dt(y)}{dy} = \theta_3 - a_2t_2, \quad (35)$$

де

$$\bar{G}_1 = \frac{c_3 LG'}{A_\lambda (\alpha_{13}F_{13}k_2 + \alpha_{23}F_{23}k_4 + \alpha'_{34}F_{34} - \alpha_{35}F_{35}k_6)};$$

$$G' = G_3 - \frac{G_{03}}{Rb};$$

$$a_1 = -\frac{\alpha_{13}F_{13}(k_1 - 1) + \alpha_{23}F_{23}(k_3 - 1) - \alpha'_{34}F_{34} + \alpha_{35}F_{35}(1 - k_5) + \alpha_e F_6(k_7 - 1)}{\alpha_{13}F_{13}k_2 + \alpha_{23}F_{23}k_4 + \alpha'_{34}F_{34} - \alpha_{35}F_{35}k_6};$$

$$b_1 = \frac{\alpha_e F_6 k_8 t'}{A_\lambda (\alpha_{13}F_{13}k_2 + \alpha_{23}F_{23}k_4 + \alpha'_{34}F_{34} - \alpha_{35}F_{35}k_6)};$$

$$\bar{G}_2 = \frac{c_p G_p L}{\alpha'_{14}F_1 k_1 + \alpha'_{24}F_2 k_3 + \alpha'_{34}F_3 + \alpha_{45}F_5 k_5};$$

$$a_1 = -\frac{\alpha'_{14}F_1(1 - k_2) + \alpha'_{24}F_2(1 - k_4) + \alpha'_{54}F_5(1 - k_6) + \alpha'_{34}F_3}{\alpha'_{14}F_1 k_1 + \alpha'_{24}F_2 k_3 + \alpha'_{34}F_3 + \alpha_{45}F_5 k_5}.$$

Розв'язуючи рівняння (34) і (35) відносно $t(y)$ і $\theta(y)$, після перетворень отримаємо:

$$A \frac{d^2 \theta_3}{dy^2} + B \frac{d\theta_3}{dy} + C\theta_3 = D_1, \quad (36)$$

$$A \frac{d^2 t}{dy^2} + B \frac{dt}{dy} + Ct = D_2, \quad (37)$$

де

$$A = \bar{G}_1 \bar{G}_2; \quad B = a_2 \bar{G}_1 + a_1 \bar{G}_2;$$

$$C = a_1 a_2 - 1; \quad D_1 = -b_1 a_2, \quad D_2 = b_1.$$

Загальний розв'язок рівнянь, за граничних умов,

$$y = 0; \quad \theta_3 = \theta_0 = \theta_1; \quad t = t_0 = t_1; \quad \frac{d\theta}{d\tau} = \frac{dt}{d\tau} = 0$$

відповідно до [10] має вигляд:

$$t(y) = c'_1 (r_1 e^{r_2 y} - r_2 e^{r_1 y}) + \frac{D_2}{C}; \quad (38)$$

$$\theta_3(y) = c'_2 (r_1 e^{r_2 y} - r_2 e^{r_1 y}) + \frac{D_1}{C}; \quad (39)$$

де

$$r'_{1,2} = \frac{-B' \pm \sqrt{B'^2 - 4AC}}{2A'},$$
$$c'_1 = \frac{t_0 C - D_2}{C(r_1 - r_2)}; c'_2 = \frac{\theta_{03} C - D_1}{C(r_1 - r_2)}. \quad (40)$$

Для визначення розподілу вологовмісту матеріалу в процесі сушіння за довжиною сушильної камери в напрямку руху використовуємо рівняння (14) при нульових значення похідної за часом:

$$\frac{c_3}{Rb} \frac{G_3 L}{m_3} \frac{\partial \theta_3}{\partial y} = -r \frac{G_4 L}{m_{30}} \frac{\partial U}{\partial y}. \quad (41)$$

Величина співвідношення $\frac{G_3}{m_3} L$ характеризує швидкість переміщення зернового матеріалу, оскільки $G_3 = \frac{m_3}{\tau}$; $\frac{L}{\tau} = v_3$, то $\frac{G}{m} L = v$ і остаточно матимемо:

$$\frac{1}{Rb(U)} c_3(U) \frac{d\theta_3}{dy} = -r_0 \frac{dU}{dy}. \quad (42)$$

Продиференціювавши рівняння (39), маємо:

$$\frac{d\theta_3(y)}{dy} = K_T (r_1 r_2 e^{r_2 y} - r_2 r_1 e^{r_1 y}) = F_1(y), \quad (43)$$

де

$$K_T = \frac{\theta_{03} C - D_1}{C(r_1 - r_2)}.$$

Підставивши отриману залежність в рівняння (41), матимемо:

$$-\frac{dU}{dy} = \frac{c_3(U) \cdot K_T}{Rb(U) \cdot r_0} (r_1 r_2 e^{r_2 y} - r_2 r_1 e^{r_1 y}), \quad (44)$$

де $c_3(U)$ – теплоємність зернового матеріалу:

$$c_3(U) = U \cdot c_v + (1-U) \cdot c_{c3}, \quad (45)$$

де c_v – питома теплоємність води; c_{c3} – питома теплоємність сухого зернового матеріалу.

За умови

$$\frac{Rb(U)}{c_3(U)} = A_R e^{nU},$$

де A_R і n – емпіричні коефіцієнти, проінтегрувавши рівняння (44)

$$-A_R r_0 \int_{U_1}^U e^{nU} dU = K_T r_1 r_2 \left[\int_0^y e^{r_2 y} dy - \int_0^y e^{r_1 y} dy \right],$$

отримаємо:

$$U(y) = \frac{1}{n} \ln \left(e^{nU_1} - K_c \left[\frac{e^{r_2 y} - 1}{r_2} - \frac{e^{r_1 y} - 1}{r_1} \right] \right); \quad (46)$$

де

$$K_c = \frac{n \cdot K_T}{A_R \cdot r_0} r_1 r_2.$$

Для отримання аналітичного виразу зміни вологості зерна в часі, треба мати залежність зміни температури матеріалу в часі. Підставимо вираз похідної температури зерна від координати $\frac{d\theta_3}{dy}$ з рівняння (43) в рівняння (19),

отримаємо:

$$\begin{aligned} c_3 \left(m_3 - \frac{m_{30}}{Rb} \right) \frac{\partial \theta_3}{\partial \tau} + c_3 L \left(G_3 - \frac{G_{03}}{Rb} \right) F_1(y) = \\ = A_\lambda \left[\alpha_{13} F_{13}(\theta_1 - \theta_3) + \alpha_{23} F_{23}(\theta_2 - \theta_3) - \right. \\ \left. - \alpha'_{34} F_{34}(\theta_3 - t) - \alpha'_e F_6(\theta_3 - \theta_6) \pm c_{35} F_{35}(\theta_3 - \theta_5) \right]. \end{aligned} \quad (47)$$

Продиференціюємо рівняння (47):

$$\frac{dt(y)}{dy} = K_t (r_1 r_2 e^{r_2 y} - r_2 r_1 e^{r_1 y}) = F_2(y), \quad (48)$$

де

$$K_e = \frac{t_{04}C - D_2}{C(r_1 - r_2)}$$

та підставимо отриману залежність в рівняння (19), матимемо:

$$\begin{aligned} m_p c_p \frac{\partial t}{\partial \tau} \pm G_p c_p F_2(y) &= \alpha'_{14} F_1(\theta_1 - t) + \\ &+ \alpha'_{32} F_3(\theta_3 - t) + \alpha'_{54} F_5(\theta_5 - t) + \alpha'_{24} F_4(\theta_2 - t); \end{aligned} \quad (49)$$

Рівняння (47) і (49) та рівняння (28) і (29) мають однакові значення правої частини, тому використовуючи підстановку (30)–(33) отримуємо рівняння динаміки зміни параметрів $\theta_3(\tau, y)$ і $t(\tau, y)$ у такому вигляді:

$$T_1 \frac{d\theta_3}{d\tau} = t - a_1 \theta_3 + b_1(y); \quad (50)$$

$$T_2 \frac{dt}{d\tau} = \theta_3 - a_2 t + b_2(y); \quad (51)$$

де

$$T_1 = \frac{c_3 m_3}{A_\lambda (\alpha_{13} F_{13} k_2 + \alpha_{23} F_{23} k_4 + \alpha'_{34} F_{34} - \alpha_{35} F_{35} k_6)};$$

$$T_2 = \frac{c_p m_p}{\alpha'_{14} F_1 k_1 + \alpha'_{24} F_2 k_3 + \alpha'_{34} F_3 + \alpha_{45} F_5 k_5};$$

$$b_1 = \frac{b_1 - G_3 c_3 L \cdot F_1(y)}{A_\lambda (\alpha_{13} F_{13} k_2 + \alpha_{23} F_{23} k_4 + \alpha'_{34} F_{34} - \alpha_{35} F_{35} k_6)};$$

$$b_2 = \frac{\pm G_3 c_3 L \cdot F_2(y)}{A_\lambda (\alpha_{13} F_{13} k_2 + \alpha_{23} F_{23} k_4 + \alpha'_{34} F_{34} - \alpha_{35} F_{35} k_6)}.$$

Розв'язок системи (50), (51) аналогічний до розв'язку рівнянь (34), (35) за початкових умов:

$$\tau = 0; \theta_3 = \theta_0 = \theta_1; t = t_0 = t_1; \frac{d\theta}{d\tau} = \frac{dt}{d\tau} = 0,$$

де θ_0, t_0 – початкові значення температури зерна і повітря, які дорівнюють їх значенням на вході.

$$\theta_3(\tau, y) = \frac{\theta_{03}C - D_1(y)}{C(r'_1 - r'_2)} (r'_1 e^{r'_2 \tau} - r'_2 e^{r'_1 \tau}) + \frac{D_1(y)}{C}; \quad (52)$$

$$t(\tau, y) = \frac{\theta_{03}C - D_1(y)}{C(r'_1 - r'_2)} (r'_1 e^{r'_2 \tau} - r'_2 e^{r'_1 \tau}) + \frac{D_1(y)}{C}; \quad (53)$$

де

$$r'_{1,2} = \frac{-B' \pm \sqrt{B'^2 - 4AC}}{2A'}; \quad A' = T_1 T_2;$$

$$B' = a_1 T_2 + a_2 T_1; \quad C = (a_1 a_2 - 1);$$

$$D_1(y) = b_2(y) - a_2 b_1(y); \quad D_2(y) = b_1(y) - a_1 b_2(y).$$

Рівняння (50) і (51) описують зміну температури зерна і повітря в часі і за довжиною сушильної камери. Для отримання залежності зміни вологовмісту матеріалу за часом і координатою продиференціюємо рівняння (52) за часом:

$$\frac{d\theta_3(\tau, y)}{d\tau} = K_\tau(y) r'_1 r'_2 (e^{r'_2 \tau} - e^{r'_1 \tau}), \quad (54)$$

де

$$K_\tau(y) = \frac{\theta_{03}C - D_1(y)}{C(r'_1 - r'_2)}$$

і підставимо отримане значення в рівняння визначення критерію Ребіндера:

$$c_3(U) \frac{d\theta}{d\tau} = -Rb(U) r_0 \frac{dU}{d\tau},$$

за умови

$$\frac{Rb(U)}{c_3(U)} = A_R e^{nU},$$

проінтегрувавши рівняння (52):

$$-A_R r_0 \int_{U_1}^U e^{nU} dU = K_\tau(y) r_1' r_2' \left[\int_0^\tau e^{r_2' y} d\tau - \int_0^\tau e^{r_1' \tau} d\tau \right],$$

отримаємо:

$$U(\tau, y) = \frac{1}{n} \ln \left(e^{nU_1} - K_{c'}(y) \cdot \left[\frac{e^{r_2' \tau} - 1}{r_2} - \frac{e^{r_1' \tau} - 1}{r_1} \right] \right), \quad (55)$$

де

$$K_{c'}(y) = \frac{n \cdot K_\tau(y)}{A_R \cdot r_0} r_1' r_2'.$$

Таким чином, основні динамічні характеристики режиму сушіння зернового та олієвмісного матеріалу в безперервно діючій установці з ІЧ-енергопідведенням можна описати рівняннями (52) і (55). Залежності (52) і (55) визначають розподіл температури і вологовмісту зернового та олієвмісного матеріалу за довжиною для будь-якого моменту часу. Для визначення параметрів зернового та олієвмісного матеріалу на виході потрібно прийняти: $y=L$. Тоді рівняння (52) і (55) будуть визначати зміну кінцевих параметрів матеріалу, тобто вологовмісту $U_2(\tau)$ і температури $\theta_2(\tau)$.

Для параметричної ідентифікації математичної моделі теплових і масообмінних процесів при ІЧ-сушінні зернових матеріалів (при вібраційному переміщенні) необхідно мати значення введених в рівняння коефіцієнтів. Теоретично коефіцієнти можна визначити лише ітераційними розрахунками, використовуючи відомі літературні дані.

5. Результати експериментальних досліджень процесів тепло-масообміну у ІЧ-сушарці

Ідентифікацію отриманих математичних моделей можна провести за даними експериментів, співставивши аналітичні і експериментально отримані залежності [14, 15]. Але визначити параметри (температуру і вологовміст) матеріалу в рухомому шарі при наявності ІЧ-опромінення і вібрацій дуже складно. Тому визначимо кінцеві параметри температури і вологовмісту зерна на виході сушарки, при різній експозиції теплової обробки. Експериментальні дані апроксимувались поліномами другого порядку, графічна інтерпретація експериментальних даних і розрахункових кривих залежності зміни температури і вологовмісту представлені на рис. 2, 3.

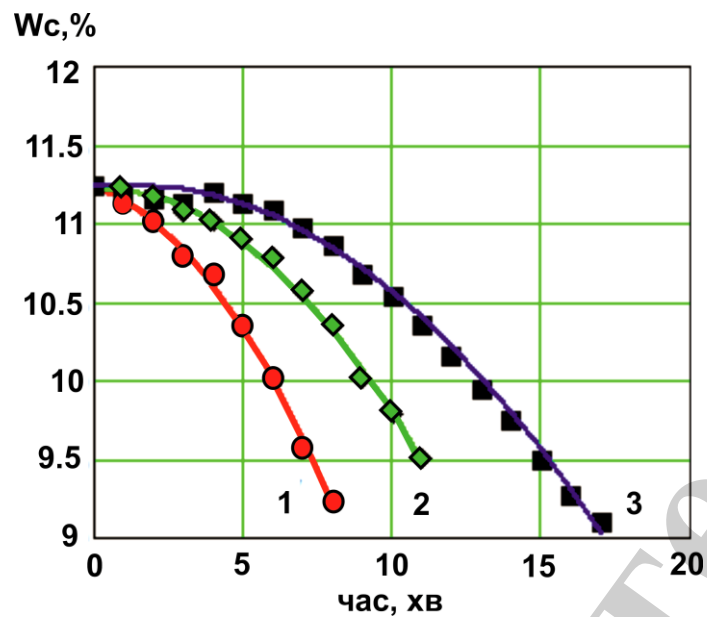


Рис. 2. Зміна вологості ріпака різномасних навісок при ГЧ- енергопідводі (експериментальні дані і криві поліноміальних регресій), $P=320$ Вт :
1 – 100 г; 2 – 200 г; 3 – 300 г

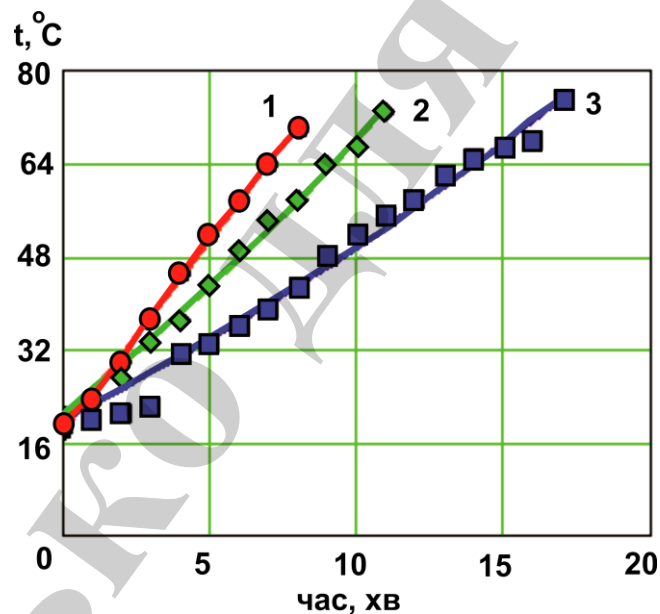


Рис. 3. Термограми сушіння різномасних навісок ріпаку при ГЧ- енергопідводі (експериментальні дані і криві поліноміальних регресій), $P=320$ Вт :
1 – 100 г; 2 – 200 г; 3 – 300 г

Для визначення критерію Ребіндера експерименти проводились в періодичному режимі сушіння, а зміна температури і маси фіксувалася в режимі реального часу, залежність зміни критерію Ребіндера від вологи матеріалу представлена на рис. 4.

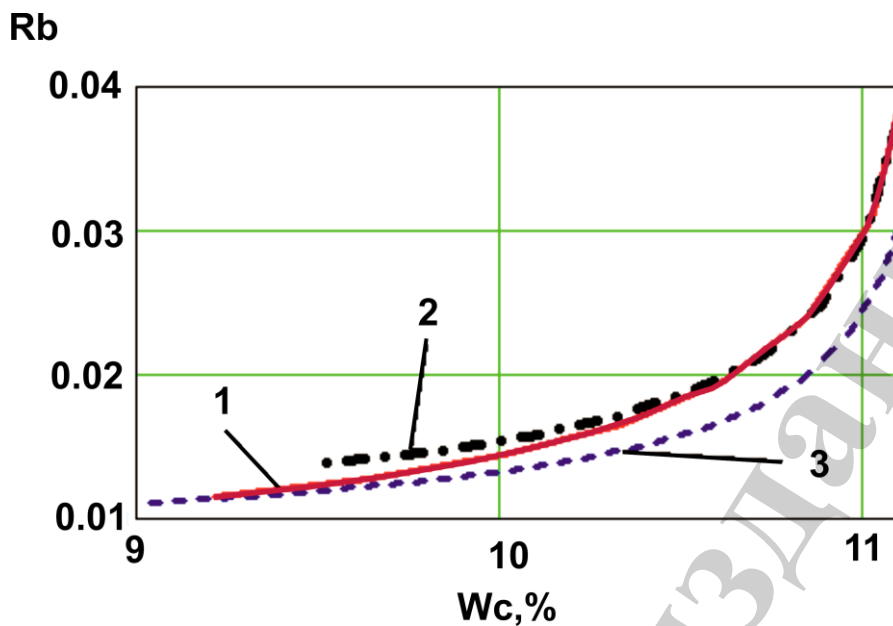


Рис. 4. Залежність критерію Ребіндера від вологості матеріалу, $P=320$ Вт:
1 – 100 г; 2 – 200 г; 3 – 300 г

Як можна бачити із рис. 4 значення критерію Ребіндера при зменшенні вологовмісту зерна теж зменшується, це свідчить про те, що із збільшенням вологовмісту зерноматеріалу питомі витрати теплоти на випаровування води теж збільшуються.

Зміна вологовмісту матеріалу в часі (крива сушіння) при роботі сушарки в безперервному режимі визначалась за методикою послідовного накладання експериментів, тобто фіксувалась зміна вологості при роботі сушарки за певний період часу.

Результати експериментів представлено графіками зміни вологості ріпаку в часі на рис. 5 (в рухомому шарі).

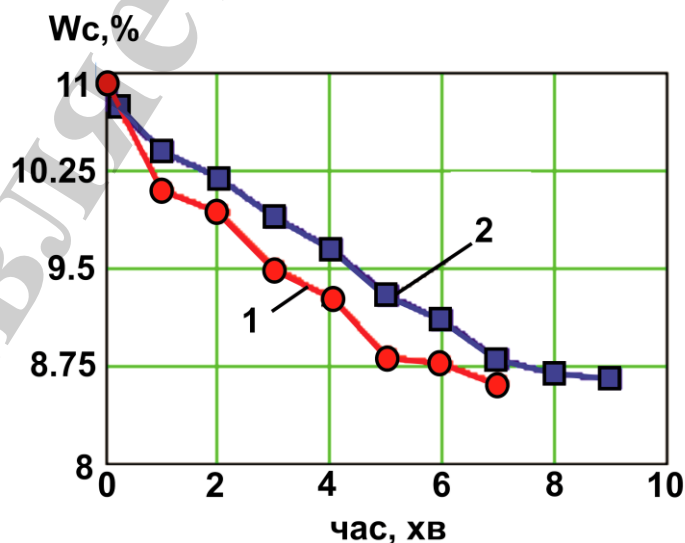


Рис. 5. Зміна вологості зерна в рухомому шарі: 1 – $P=500$ Вт, 2 – $P=400$ Вт

В цьому випадку аналітичну залежність можна використати для ідентифікації математичних моделей, шляхом порівняння з експериментальними даними.

Використовуючи алгоритм Левенберга-Маркварда та методику параметричної ідентифікації нагрівальних установок [16], визначено основні параметричні комплекси моделей (50) і (53). Так, зокрема, на рис. 6 зображена графічна інтерпретація розрахункових кривих за аналітичною залежністю (53) і експериментальні точки.

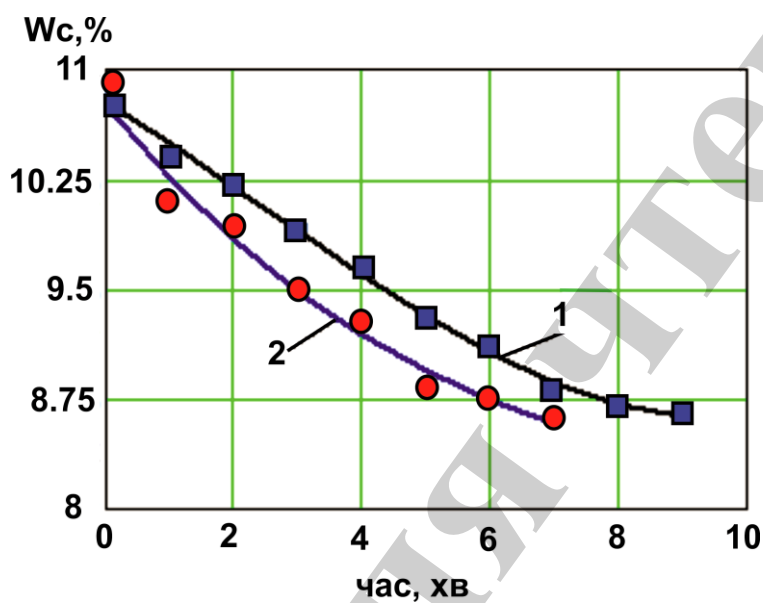


Рис. 6. Експериментальні дані сушіння зерна ріпаку і розрахункові криві:
1 – $P=400$ Вт, 2 – $P=500$ Вт

Як можна бачити з рис. 6, теоретичні криві з ідентифікованими параметричними комплексами описують експериментальні точки з відхиленням менше 5 %.

6. Обговорення результатів математичного моделювання та експериментальної ідентифікації моделі

Методами аналітичного моделювання на основі рівнянь енергетичних і матеріальних балансів, узагальненнями експериментальних даних на основі теорії подібності, ймовірності і математичної статистики розроблено математичну модель процесів тепломасообміну. Особливістю і цінністю запропонованої моделі є те, що встановлюються закономірності теплової і матеріальної взаємодії між усіма об'єктами тепло- і масообміну всередині сушарки. Наведений наближений аналітичний розв'язок представленої моделі дозволяє:

– наближено визначати поля температури і вологовмісту зернового матеріалу в часі і за координатою в напрямку переміщення;

– провести визначення і уточнення параметричних комплексів моделі за емпіричними залежностями кінетики нагріву і зневоднення зерно матеріалу;

– в подальшому використовувати дану модель для синтезу системи оптимального управління процесом.

Результати експериментальних досліджень представлені у вигляді кривих, отриманих апроксимацією експериментальних даних. Визначені залежності дозволяють узагальнювати експериментальні дані у вигляді критеріальних залежностей, зокрема на рис. 4 представлена залежність критерію Ребіндера, використання якої дозволяє наближено аналітично розв'язати модель (8)–(15).

За отриманими емпіричними математичними моделями кінетик нагріву і сушіння проведено параметричну ідентифікацію наближених розв'язків аналітичної математичної моделі. Визначені уточнені кінетичні коефіцієнти залежностей дозволяють в подальшому значно підвищити точність чисельного розв'язку розробленої аналітичної моделі.

Наведені результати досліджень будуть корисними для удосконалення установок і технологій комбінованого сушіння при ІЧ-енергопідведенні. Але при їх практичному використанні потрібно враховувати наступне. Представлені математичні моделі – кінетичні, тобто не враховують розподіл температури і вологовмісту всередині зернівки, що обмежує їх застосування при високоінтенсивному ІЧ-енергопідведенні і збільшенні геометричних розмірів зернівки.

В даному дослідженні для спрощення аналітичних розрахунків лінеаризували коефіцієнти радіаційного теплообміну і не враховували особливості поглинання матеріалом ІЧ-випромінювання. Але нелінійна або кусково-лінійна апроксимація коефіцієнтів радіаційного обміну і врахування змінних оптичних коефіцієнтів матеріалу при ІЧ-енергопідведенні значно ускладнить математичні викладки і може призвести до неможливості отримання наближеного розв'язку системи балансових рівнянь.

7. Висновки

1. Розроблено математичну модель процесів тепло- і масообміну у вібрацій сушарці з ІЧ-енергопідведенням, в якій враховано перенесення теплоти конвективним і радіаційним способами між усіма взаємодіючими об'єктами всередині сушарки. Представлений наближений розв'язок системи дозволяє прогнозувати розвиток полів температури і вологовмісту в залежності від підведеної потужності ІЧ-випромінювача для подальшого розрахунку енергоефективності сушарки і синтезу системи оптимального управління процесом.

2. На основі результатів експериментальних досліджень кінетики нагріву і зневоднення зерно матеріалу встановлено вплив параметрів ІЧ-сушарки на експозицію процесу сушіння. Зокрема, при збільшенні потужності ІЧ-джерела від 400 до 500 Вт час сушіння з початкової вологості матеріалу 11 % до вологості 8,75 % зменшується з 9 до 7 хвилин. Встановлено, що критерій Ребіндера, який характеризує вологотеплові характеристики матеріалу, зменшується при зменшенні його вологості з величини 0,04 при 11 % до 0,01 при 9 %. Це обґрунтовано свідчить про те, що із збільшенням вологовмісту матеріалу питомі витрати теплоти на випаровування вологи також збільшуються.

3. Ідентифіковано параметричні комплекси кінцевих аналітичних залежностей методом обернених задач. Продемонстрована відповідність в межах 95–98 % між експериментальними даними і теоретичними розрахунками з використанням визначених параметричних комплексів.

Література

1. Тепловая обработка зерна в установках контактного типа: монографія / Курдюмов В. И., Павлушин А. А., Карпенко Г. В., Сутягин С. А. Ульяновск, 2013. 290 с.
2. Калініченко Р. А., Войтюк В. Д. Енергоефективні режими роботи машин для високоінтенсивної термообробки зернових матеріалів: монографія. Ніжин, 2017. 261 с.
3. Improvement of IR emitter to create non-reflector dryer for plant raw materials / Kiptelaya L., Zahorulko A., Zagorulko A., Liashenko B. // Technology audit and production reserves. 2017. Vol. 2, Issue 3 (34). P. 17–22. doi: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.98068>
4. Das I., Das S. K., Bal S. Drying kinetics of high moisture paddy undergoing vibration-assisted infrared (IR) drying // Journal of Food Engineering. 2009. Vol. 95, Issue 1. P. 166–171. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.04.028>
5. Бурдо О. Г. Еволюція сушильних установок. Одеса: Полиграф, 2010. 368 с.
6. Рудобашта С. П. Карташов Э. М. Диффузия в химико-технологических процессах. М., 2009. 478 с.
7. Coradi P. C., Fernandes C. H. P., Helmich J. C. Adjustment of mathematical models and quality of soybean grains in the drying with high temperatures // Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. 2016. Vol. 20, Issue 4. P. 385–392. doi: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n4p385-392>
8. Kats V. Y., Mazor G. Drying of granules in vibrating suspended bed: Engineering simulation // Russian Journal of Applied Chemistry. 2010. Vol. 83, Issue 9. P. 1707–1716. doi: <https://doi.org/10.1134/s1070427210090399>
9. Nikitenko N. I., Snezhkin Y. F., Sorokovaya N. N. Development of a theory and methods for calculating the heat and mass transfer in drying a porous body with multicomponent vapor and liquid phases // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2008. Vol. 81, Issue 6. P. 1153–1167. doi: <https://doi.org/10.1007/s10891-009-0132-x>
10. Дубровин В., Калиниченко Р., Кифяк В. Моделирование динамики тепловых процессов при микронизации и сушении зернопродуктов в терморрадиационных установках ИК-излучением // Motrol: International journal on operation of farm and agri-food industry machinery. 2015. Т. 17, № 3. С. 150–157.
11. Котов Б. І., Кіфяк В. В., Калініченко Р. А. Математична модель динамічних режимів електротермічної установки для обробки зерноматеріалів імпульсними потоками інфрачервоного випромінювання // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2014. Вип. 152. С. 181–191.

12. Istadi I., Sitompul J. P. A comprehensive mathematical and numerical modeling of deep-bed grain drying // *Drying Technology*. 2002. Vol. 20, Issue 6. P. 1123–1142. doi: <https://doi.org/10.1081/drt-120004043>
13. Research into technological process of convective fruit drying in a solar dryer / Korobka S., Babych M., Krygul R., Tolstushko N., Tolstushko M. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 3, Issue 8 (87). P. 55–63. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.103846>
14. Акулич П. В. Расчеты сушильных и теплообменных установок. Минск, 2010. 443 с.
15. Метод определения коэффициента диффузии в пористых средах на основе решения обратной задачи массопереноса / Никитенко Н. И., Снежкин Ю. Ф., Сороковая Н. Н. и др. // *Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій*. 2011. Вип. 39 (2). С. 17–22.
16. Котов Б. І., Кифяк В. В. Ідентифікація динамічних режимів нагріву і сушіння зернопродуктів ІЧ-випромінюванням // *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК*. 2014. Вип. 194 (2). С. 165–170.