

УДК 631.365.22

А.А. Ящук

Луцький національний технічний університет

## ОБҐРУНТУВАННЯ ПЕРЕМІШУВАННЯ МАТЕРІАЛУ В ПРОЦЕСІ СУШІННЯ НАСІННЯ ЛЬОНУ ОЛІЙНОГО

У статті представлено моделі, що описують процес сушіння товстого шару матеріалу в сушарці для насіння льону олійного в нерухомому стані, а також при його перемішуванні в процесі сушіння. Проведено розрахунки і одержано результати, що дозволяють оцінити доцільність процесу перемішування в сушарці даної конструкції.

Ключові слова: сушарка, льон олійний, товстий шар, тонкий шар, перемішування, розпушування, циліндрична сушильна камера.

**Постановка проблеми.** Надмірна вологість під час зберігання насіння різних культур зумовлює його псування, тому сушіння є важливою складовою в технології виробництва сільськогосподарської продукції, що робить можливим збереження якості продукції протягом тривалого часу. Водночас процес штучного сушіння є дуже енергоємним, а недотримання режимних параметрів сушіння також здійснює негативний вплив на технологічні якості насіння, знижує схожість насіння. Зважаючи на малі розміри насіння льону олійного, воно характеризується підвищеною чутливістю до перегріву, а його форма ускладнює проходження сушильного агента крізь нерухомий шар [1] і зумовлює низьку ефективність сушіння. Тому розробка нових засобів для сушіння насіння льону олійного і вдосконалення технології сушіння цього матеріалу, що забезпечить підвищення енергоефективності процесу з забезпеченням високої якості кінцевого матеріалу, є актуальною проблемою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблемам сушіння різних матеріалів, зокрема рослинних, підвищенням енергоефективності цього процесу, присвячені роботи багатьох дослідників, зокрема А.В. Ликова [2], Б.І. Котова [3], В.Ф. Дідуха [4] та ін. Проте питання, пов'язані з сушінням насіння льону, потребують більш глибоких досліджень.

**Постановка завдання.** Змодельовати процес сушіння стаціонарного шару сипкого матеріалу (насіння льону олійного) в нерухомому стані, а також при його перемішуванні з розпушуванням в сушарці з циліндричною сушильною камерою. На основі одержаних результатів зробити аналіз ефективності і доцільності застосування перемішування матеріалу в процесі сушіння.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Особливостями насіння льону олійного, особливо при сушінні існуючими засобами для зниження вологості, є його висока чутливість до перегрівання у зв'язку з малими розмірами, ускладнене переміщення сушильного агента крізь нерухомий шар матеріалу. Зважаючи на недоліки існуючих засобів сушіння, які використовуються для зниження вологості насіння льону олійного [1], була запропонована нова конструкція сушарки [5], в якій використано спіралеподібні активатори для розпушування і перемішування матеріалу в процесі сушіння (рис. 1). Процес сушіння матеріалу, що перебуває у сушильній камері, обмеженій зовнішньою 1 і внутрішньою 2, циліндричними перфорованими стінками, відбувається з одночасним його перемішуванням і розпушуванням спіралеподібними активаторами 3.

Сушильна камера запропонованої сушарки насіння льону олійного представляє собою простір, обмежений зовнішньою циліндричною перфорованою стінкою радіусом  $r_{\max}$  і встановленою концентрично їй внутрішньою перфорованою циліндричною стінкою радіусом  $r_{\min}$ , крізь яку в сушильну камеру підводиться сушильний агент (рис. 2). Розглянемо товстий циліндричний шар матеріалу товщиною  $\Delta r = r_{\max} - r_{\min}$  як сукупність  $n$  елементарних тонких шарів товщиною  $s_i$ , а загальну тривалість сушіння як сукупність коротких проміжків часу тривалістю  $\Delta \tau$ . Тоді параметри кожного тонкого шару: вологість  $u_{i,j}$  і температура  $\theta_{i,j}$ , а також параметри сушильного агента, що проходить крізь ці шари матеріалу: вологовміст  $d_{i,j}$  і температура  $t_{i,j}$ , будуть зв'язані між собою в просторі і часі. Тривалість від початку сушіння визначатиметься як  $\tau_j = \Delta \tau \cdot j$ .

Зміну вологості матеріалу з часом виразимо через залежність Гендерсона-Пабіса як [6]:

$$MR = a \cdot \exp(-k \cdot \tau_j), \quad (1)$$

де  $MR$  – коефіцієнт, що характеризує зниження вологості матеріалу відносно початкової під час сушіння;  $a, k$  – невідомі коефіцієнти, що визначаються властивостями конкретного матеріалу і режимами сушіння;  $\tau_j$  – тривалість сушіння, хв.

$$MR = \frac{u - u_p}{u_0 - u_p}, \quad (2)$$

де  $u_0$  – початкова абсолютна вологість матеріалу, %;  $u$  – абсолютна вологість матеріалу через час  $\tau_j$  від початку сушіння, %;  $u_p$  – рівноважна вологість матеріалу, %.

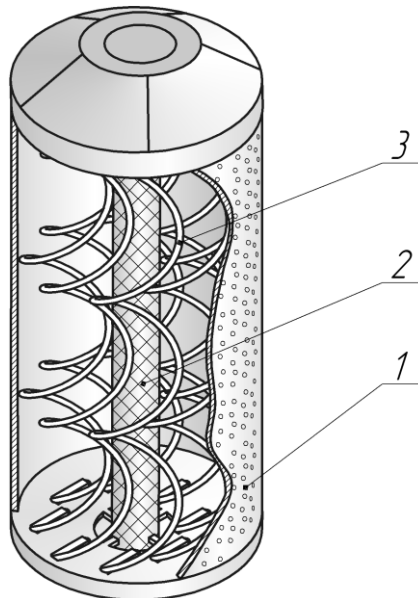


Рис. 1. Сушільна камера сушарки насіння льону олійного: 1 – зовнішня перфорована стінка сушильної камери; 2 – внутрішня перфорована стінка сушильної камери для подачі сушильного агента; 3 – спіральні активатори для розпушування і перемішування матеріалу.

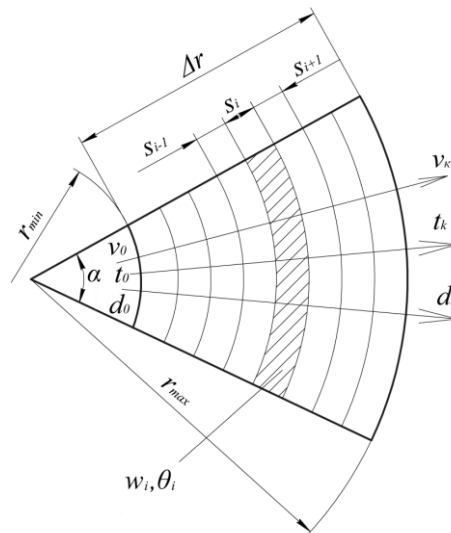


Рис. 2. Параметри сушильної камери сушарки

Прирівнявши праву частину виразів (1) і (2) встановимо вологість  $i$ -го тонкого шару насіння льону олійного. У цьому шарі матеріалу через час сушіння  $\tau_j = \Delta\tau \cdot j$  вологість матеріалу становитиме:

$$u_{i,j} = a \cdot \exp(-k \cdot \tau_j) \cdot (u_0 - u_p) + u_p, \quad (3)$$

Значення коефіцієнтів  $a$  і  $k$  як функції від температури  $t$  і швидкості  $v$  сушильного агента були встановлені за результатами власних експериментальних досліджень:

$$a = 1,347708 - 0,168 \cdot v - 0,006387 \cdot t_{i,j} + 0,061 \cdot v^2, \quad (4)$$

$$k = 0,179083 - 0,10775 \cdot v - 0,004767 \cdot t_{i,j} + 0,0435 \cdot v^2 + 0,000063 \cdot t_{i,j}^2. \quad (5)$$

Рівноважну вологість визначимо з рівняння Гендерсона [6]:

$$u_p = \left( -\frac{\ln(1-\varphi)}{1,76 \cdot 10^{-4} \cdot (\theta_{i,j-1} + 56,228)} \right)^{0,525}, \quad (6)$$

де  $\varphi$  – відносна вологість повітря (сушильного агента).

Вологість сушильного агента [7]:

$$\varphi = \frac{745 \cdot d_{i,j}}{(622 + d_{i,j}) \cdot 10^{0,622 + 7,5 \cdot t_{i,j} / (238 + t_{i,j})}}. \quad (7)$$

Температуру  $i$ -го тонкого шару  $\theta_{i,j}$  після часу сушіння  $\tau_j = \Delta \tau \cdot j$  при температурі сушильного агента на вході в цей шар  $t_{i-1,j}$ , відносній вологості  $u_{i,j}$  в період падаючої швидкості сушіння визначатимемо з залежності [2]:

$$\theta_{i,j} = t_{i-1,j} - b \cdot (u_{i,j} - u_p), \quad (8)$$

де  $b$  – коефіцієнт, встановлений з температурних кривих кінетики сушіння на основі експериментальних досліджень (для різних швидкостей сушильного агента і різної вологості льону олійного, у період падаючої швидкості сушіння він становив  $b = 1,9 \dots 2,2$ ).

Вологовміст  $i$ -го тонкого шару вкінці  $j$ -го короткого проміжку часу в циліндричній сушильній камері визначатимемо як відношення маси вологості в сушильному агенті, до маси сухого сушильного агента, що заповнює цей  $i$ -й шар матеріалу. Отже, вологовміст на виході з  $i$ -го тонкого шару матеріалу вкінці  $j$ -го короткого проміжку часу:

$$d_i = \frac{m_{napuij} + m_{sun.i,j}}{m_{c.n.i}}, \quad (9)$$

де  $m_{napuij}$  – початкова маса води в сушильному агенті, що заповнює  $i$ -й тонкий шар матеріалу на початку  $j$ -го короткого проміжку часу, г;  $m_{sun.i,j}$  – маса води, випаруваної в результаті зниження вологості  $i$ -го тонкого шару від  $u_{i,j-1}$  до  $u_{i,j}$ ;  $m_{c.n.i}$  – маса сухого повітря, що заповнює  $i$ -й тонкий шар матеріалу, кг.

Маса сухого повітря, що заповнює  $i$ -й циліндричний шар матеріалу визначиться за формулою:

$$m_{c.n.i} = \rho_{c.n.} \cdot \xi \cdot \alpha \cdot h \cdot s_i \cdot (r_{min} + s_i \cdot (i + 0,5)), \quad (10)$$

де  $\rho_{c.n.}$  – густина сухого повітря, кг/м<sup>3</sup>;  $\xi$  – шпаруватість матеріалу;  $\alpha$  – кут сектора частини циліндричної сушильної камери;  $h$  – висота шару матеріалу, м;  $s_i$  – товщина  $i$ -го елементарного тонкого шару матеріалу, м;  $r_{min}$  – радіус внутрішньої стінки сушильної камери, м.

Маса випаруваної води  $m_{sun.i}$  визначиться за формулою:

$$m_{sun.i,j} = \frac{(u_{i,j-1} - u_{i,j}) \cdot \rho_{mat} \cdot \alpha \cdot h \cdot s_i \cdot (r_{min} + s_i \cdot (i + 0,5))}{100 + u_{i,j-1}}. \quad (11)$$

Визначимо масу пари  $m_{napuij}$ , а також початковий вологовміст сушильного агента, що подається в  $i$ -й тонкий шар матеріалу на початку  $j$ -го короткого проміжку часу  $d_{(i-1),j} = d_{i,j}$ :

$$d_{(i-1),j} = \frac{m_{napuij}}{m_{c.n.i}}. \quad (12)$$

Оскільки, об'єм повітря на виході з  $i$ -го тонкого шару рівний об'єму повітря з вологовмістом  $d_{(i-1),j}$  на вході в цей шар, то приймаємо, що  $V_i = V_{(i-1)}$  (рис. 3), а  $m_{napuij}$  визначимо за формулою:

$$m_{napuij} = m_{napu(i-1),j} = m_{napu(i-1),j} + m_{napu(i-2),j}, \quad (13)$$

$$m_{напуі-1,j} = d_{i-1,j} \cdot m_{с.н.i-1}, \quad (14)$$

$$m_{напуі(i-2),j} = d_{i-2,j} \cdot m_{с.н.(i-2)}, \quad (15)$$

$$m_{с.н.} = \rho_{с.н.} \cdot \xi \cdot \alpha \cdot h \cdot s_i \cdot (r_{\min} + s_i \cdot (i + 0,5)), \quad (16)$$

$$m_{с.н.(i-2)} = m_{с.н.i} - m_{с.н.i-1}. \quad (17)$$

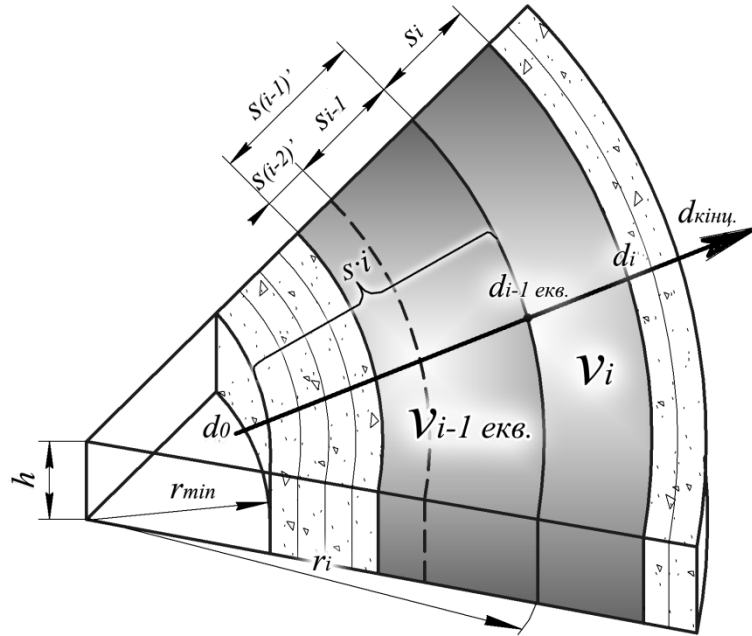


Рис. 3. Визначення вологовмісту сушильного агента в  $i$ -му тонкому шарі матеріалу

Підставимо (13-17) в (12) і після спрощення отримаємо:

$$d_i = \frac{d_{i-1,j} \cdot (r_{\min} - s_i \cdot (0,5 - i)) + d_{i-2,j} \cdot s_i}{r_{\min} + s_i \cdot (0,5 + i)} + \frac{(u_{i,j-1} - u_{i,j}) \cdot \rho_{мат}}{(100 + u_{i,j-1}) \cdot \rho_{с.н.} \cdot \xi \cdot 1000}. \quad (18)$$

Затрати теплоти на нагрівання шару матеріалу і випаровування рідини визначимо за формулою (кДж/кг) [8]:

$$Q_{i,j} = G \cdot c_{мат} \cdot (\theta_{i-1,j} - \theta_{i,j}) + W_{i,j} \cdot (H_{ni,j} - H_{pi,j}). \quad (19)$$

де  $G$  – продуктивність, кг/год, в перерахунку на тонкий шар матеріалу в короткий проміжок часу  $G = h \cdot S \cdot \rho / \Delta \tau$ ;  $c_{мат}$  – питома теплоємність матеріалу, Дж/(кг·К);  $W_{i,j}$  – втрата вологи, що виділяється з матеріалу в процесі сушіння, кг;  $H_{ni,j}$  і  $H_{pi,j}$  – відповідно ентальпія пари і рідини, кДж/кг, ( $H_n = 2500 + 1,842 \cdot t_{i-1,j}$ ,  $H_p = 4,19 \cdot \theta_{i,j}$ ), [8].

Втрата вологи:

$$W_{i,j} = G \cdot \frac{u_{i,j-1} - u_{i,j}}{100 - u_{i,j}}. \quad (20)$$

Температуру сушильного агента на виході з  $i$ -го тонкого шару матеріалу знайдемо з формули:

$$Q_{i,j} = L_{i,j} \cdot (1 + d_{i,j}) \cdot c_{нов.} \cdot (t_{i,j-1} - t_{i,j}), \quad (21)$$

$$L_{i,j} = W_{i,j} / (d_{i,j} - d_{i,j-1}), \quad (22)$$

де  $c_{нов.}$  – питома теплоємність повітря, кДж/(кг·К);  $L_{i,j}$  – витрата сухого повітря, кг.

Підставивши в (21) залежності (19), (20), (22), а також  $H_{ni,j}$  і  $H_{pi,j}$ , визначимо температуру сушильного агента на виході з  $i$ -го тонкого шару матеріалу:

$$t_{i,j} = t_{i-1,j} - \frac{c_{mat} \cdot (\theta_{i-1,j} - \theta_{i,j}) + (u_{i,j-1} - u_{i,j}) \cdot (H_{ni,j} - H_{pi,j}) \cdot (d_{i,j} - d_{i,j-1})}{c_{нов} \cdot (u_{i,j-1} - u_{i,j}) \cdot (1 + d_{i,j})}. \quad (23)$$

Приймаємо, що кількість повітря, яка подається за одиницю часу в сушильну камеру через внутрішню перфоровану стінку радіусом  $r_{min}$  рівна кількості повітря, що проходить через  $i$ -й тонкий шар матеріалу, визначимо швидкість сушильного агента на вході в  $i$ -й тонкий шар матеріалу товщиною  $s$ , за формулою:

$$v_i = \frac{v_0 \cdot r_{min}}{r_{min} + s \cdot (i + 0,5)}, \quad (24)$$

де  $v_0$  – початкова швидкість сушильного агента на вході в сушильну камеру, м/с.

У результаті сушіння нерухомого шару сипкого матеріалу виникає градієнт вологості і температур за його об'ємом, що в результаті призводить до нерівномірності сушіння матеріалу, перегрівання і пересушування окремих його частин. Складність сушіння сипких матеріалів, зокрема насіння льону в нерухомому шарі, також полягає у великому опорі нерухомого шару сушильному агенту, що особливо актуально для насіння льону олійного, яке характеризується дрібними розмірами і великою щільністю.

Процес перемішування являє собою перерозподіл в просторі частинок матеріалу певної вологості і температури. Під розпушуванням розуміється зменшення щільності сипкого матеріалу.

Отже, розглядаючи процес сушіння насіння льону олійного з перемішуванням і розпушуванням, слід враховувати зміну фізико-механічних властивостей матеріалу, таких як щільність і шпаруватість, а також обмін тонких шарів матеріалу вологою і температурою.

Розглянемо нерухомий тонкий шар матеріалу в довільний час після початку сушіння  $\tau_j > 0$ .

Тоді в кожному  $i$ -му тонкому шарі цього матеріалу його температура буде становити  $\theta_{i,j}$ , а вологість  $u_{i,j}$ . За умови перемішування цього матеріалу відбувається заміщення частинок  $i$ -го тонкого шару матеріалу з відомим значеннями  $\theta_{i,j}$  та  $u_{i,j}$  частинками з інших тонких шарів 1, 2, ...  $i-2$ ,  $i-1$ ,  $i+1$ ,  $i+2$ , ...  $n-1$  і  $n$  з відмінними від  $\theta_{i,j}$  і  $u_{i,j}$  параметрами.

Виразимо загальну масу  $i$ -го тонкого шару матеріалу через коефіцієнт  $K_i = 1$ . Тоді в результаті перемішування протягом короткого проміжку часу  $\Delta\tau$  в кожному  $i$ -му тонкому шарі матеріалу температуру і вологість суміші, утвореної з частинок матеріалу різних температур і вологості, знайдемо за формулами:

$$\theta_{i,j}^{суміші} = \theta_{1,j} \cdot K_{i(1)} + \dots + \theta_{i-1,j} \cdot K_{i(i-1)} + \theta_{i,j} \cdot K_{i(i)} + \theta_{i+1,j} \cdot K_{i(i+1)} + \dots + \theta_{n,j} \cdot K_{i(n)} = \sum_{(i)=1}^n \theta_{(i),j} \cdot K_{i(i)}, \quad (25)$$

$$u_{i,j}^{суміші} = u_{1,j} \cdot K_{i(1)} + \dots + u_{i-1,j} \cdot K_{i(i-1)} + u_{i,j} \cdot K_{i(i)} + u_{i+1,j} \cdot K_{i(i+1)} + \dots + u_{n,j} \cdot K_{i(n)} = \sum_{(i)=1}^n u_{(i),j} \cdot K_{i(i)}, \quad (26)$$

$$K_i = \sum_{(i)=1}^n K_{i(i)} = 1. \quad (27)$$

де  $K_{i(1..n)}$  – коефіцієнт масової частки матеріалу в  $i$ -му тонкому шарі, заміщеної матеріалом з  $(1 \div n)$  тонких шарів в результаті перемішування.

Знайдемо значення коефіцієнта  $K_{i(1..n)}$  для кожного  $i$ -го тонкого шару матеріалу, керуючись припущенням, що розсіювання частинок кожного тонкого шару матеріалу між сусідніми шарами відбувається за законом нормального розподілу [9].

Тоді для плоского шару матеріалу постійної товщини (рис. 4, а) згідно з законом нормального розподілу, беручи до уваги (27), коефіцієнт  $K_{i(i)}$  знайдемо за формулами:

$$K_i = \frac{k_{i(i)}}{\sum_{(i)=1}^n k_{i(i)}}, \quad (28)$$

$$k_{i(i)} = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}\right), \quad (29)$$

де  $x$  – координата (відстань між  $i$ -м і  $(i+1)$ -м тонкими шарами, для яких розраховується коефіцієнт  $k_{i(i)}$ ), м;  $\mu$  – математичне сподівання ( $\mu = 0$ , оскільки початок відліку координатної осі  $x$  збігається з точкою середини тонкого шару матеріалу), м;  $s$  – товщина  $i$ -го тонкого шару матеріалу, м;  $\sigma^2$  – дисперсія випадкової величини.

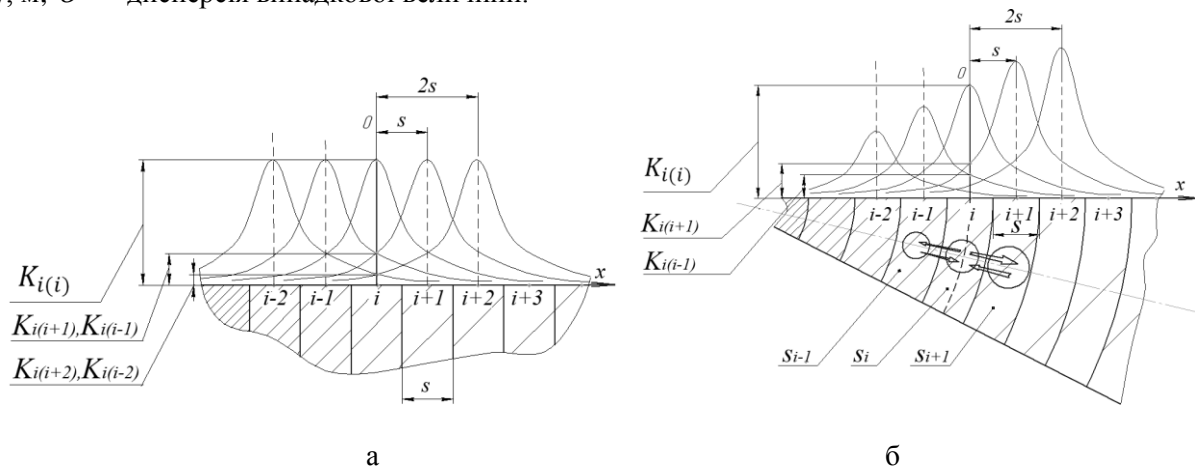


Рис. 4. Графічна інтерпретація коефіцієнта  $K_{i(i+x)}$ : а – для плоского тонкого шару матеріалу; б – для циліндричного тонкого шару матеріалу.

Величина  $\sigma$  визначає форму функції кривої розсіювання і характеризує інтенсивність перемішування. При  $\sigma = 0$  перемішування не відбувається, при  $\sigma \rightarrow \infty$  перемішування наближається до ідеального. Величина  $\sigma$  залежить від тривалості перемішування (заданої величини проміжку часу  $\Delta\tau$ ), конструктивних (крок витка спіралі, міжосьова відстань) і режимних (частота обертання) параметрів робочих органів для перемішування і встановлюється експериментально.

Розглянемо сушильну камеру циліндричної форми заповнену матеріалом, що піддається сушінню з одночасним розпушуванням і перемішуванням.

Зважаючи на симетричність сушильної камери і тонких циліндричних шарів матеріалу, процес перемішування доцільно описати функцією одномірного розподілу в напрямку радіуса сушильної камери.

Відмінність циліндричного шару від плоского (рис. 4) полягає в тому, що об'єм кожного елементарного тонкого шару товщиною  $s$  буде змінюватись прямопропорційно до радіуса. Відповідно маса частинок, переміщених між будь-якими сусідніми тонкими шарами за одиницю часу також буде не постійною для кожного тонкого шару, тому для циліндричного тонкого шару матеріалу залежність (29) представимо в наступному вигляді:

$$k_{i(i)} = k_{r(i)} \cdot \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(s \cdot (i))^2}{2 \cdot \sigma^2}\right), \tag{30}$$

де  $k_{r(i)}$  – коефіцієнт, що враховує зміну маси тонких шарів матеріалу як функцію від радіуса.

Для  $i$ -го тонкого шару масою  $v_i$  коефіцієнт  $k_{r(i)} = 1$ . Тоді для довільного  $i+n$ -го тонкого шару об'ємом  $v_{i+n}$  коефіцієнт:

$$k_{r(i)} = \frac{v_{i+n}}{v_i}$$

або

$$k_{r(i)} = 1 + \frac{n}{\frac{r_0}{s} + i - 0,5}. \tag{31}$$

Підставивши (31) в (30) отримаємо:

$$k_{i(i)} = \left( 1 + \frac{n}{\frac{r_0}{s} + i - 0,5} \right) \cdot \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp \left( - \frac{(s \cdot (i))^2}{2 \cdot \sigma^2} \right). \quad (32)$$

Рівняння (28) і (32) дозволяють визначити коефіцієнти, необхідні для розрахунку параметрів суміші згідно з формулами (25-26) для циліндричної сушильної камери.

З використанням комп'ютерного програмного забезпечення Free Pascal Lazarus 0.9 було реалізоване ПЗ, що автоматизує процес розрахунку для запропонованої моделі сушіння (рис. 5).

Результати розрахунку зниження вологості шару матеріалу з часом за висотою шару матеріалу представлено у вигляді графіків (рис. 6). Для розрахунку без перемішування і з перемішуванням приймалися однакові початкові параметри матеріалу: абсолютна вологість 17%, товщина розрахункового шару 0,02 м, температура 20°C і параметри сушильного агента: вологовміст 6 г/кг с.п., температура 45 °C. Кожній кривій на графіку відповідає вологість тонкого елементарного шару матеріалу.

**Вихідні дані для розрахунку:**

Початкова вологість матеріалу W<sub>0</sub>, %

Кінцева вологість матеріалу, %

Початкова температура матеріалу t<sub>m</sub> °C

Температура сушильного агента t с.а., °C

Вологовміст сушильного агента d, г/кг с.п.

Товщина шару матеріалу H, м

Початковий радіус r<sub>0</sub>, м

Початкова швидкість сушильного агента V, м/с

Охолодження після сушіння (тільки нерухомий шар)

Температура повітря для охолодження, t с.а., °C

Розрахункові короткі проміжки часу, хв

Зупиняти розрахунок при кількості інтервалів j=

**Властивості матеріалу і сушильного агента:**

Теплоємність матеріалу C<sub>p</sub>   за формулою

Теплоємність повітря C<sub>p</sub>

Об'ємна маса матеріалу кг/м<sup>3</sup>

Питома вага повітря, кг/м<sup>3</sup>

Прихов. тепл. пароутворення води g

**Результати розрахунку:**

**Тривалість сушіння матеріалу для досягнення необхідної вологості 43,5 хв**

Вологість, W <sub>i,j</sub>	Температура агента, t <sub>i,j</sub>		Вологовміст, d <sub>i,j</sub>		Температура матеріалу, T <sub>i,j</sub>		
	n=1	n=2	n=3	n=4	n=5	n=6	n=7
l=1	16,1202109	16,4571758	16,6533220	16,7750651	16,8526663	16,9031986	16,9366561
l=2	16,0273240	16,0650183	16,2229175	16,3897460	16,5343238	16,6505151	16,7408014
l=3	15,9350786	15,9757391	16,0140532	16,1017409	16,2191967	16,3439578	16,4618094
l=4	15,8434703	15,8861521	15,9266892	15,9661330	16,0257057	16,1082260	16,2059073
l=5	15,7524946	15,7970828	15,8394611	15,8807115	15,9208496	15,9689533	16,0308833
l=6	15,6621472	15,7085862	15,7527444	15,7956099	15,8372667	15,8777742	15,9210854
l=7	15,5721227	15,6207101	15,6665887	15,7110145	15,7540818	15,7958828	15,8361060

Рис. 5. Реалізація моделі процесу сушіння насіння льону олійного без перемішування і з перемішуванням у процесі сушіння

Аналіз одержаних на основі розробленої моделі результатів розрахунків (рис. 6) показує, що в процесі сушіння з перемішуванням (рис.6, б) нерівномірність сушіння за товщиною шару знижується в порівнянні з нерухомим шаром (рис.6, а). Тривалість сушіння до досягнення середньої вологості нерухомого шару матеріалу при заданих параметрах сушіння згідно з розрахунком складала 43,7 хв, у той час як при сушінні з перемішуванням шару матеріалу з різною інтенсивністю – в межах 38,6...41 хв.

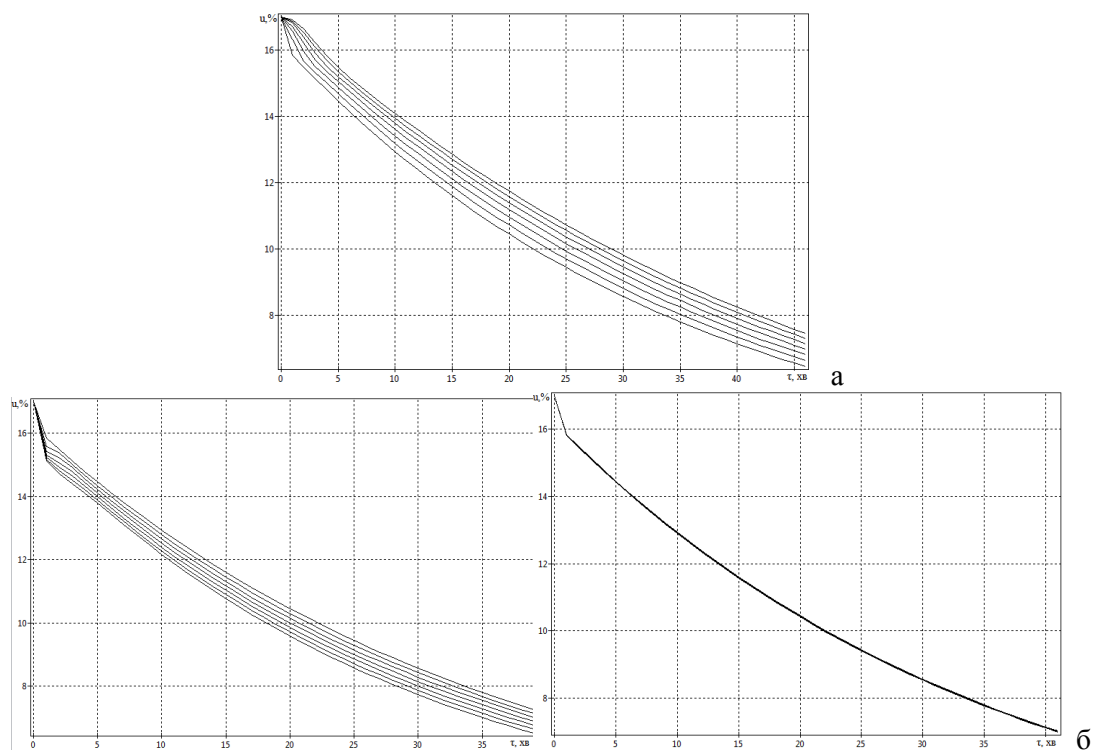


Рис. 6. Зміна вологості шару насіння льону олійного при його сушінні: а – без перемішування; б – з перемішуванням.

### Висновки

У процесі дослідження було запропоновано модель, що описує процес сушіння товстого шару матеріалу в нерухомому стані, а також при його перемішуванні в процесі сушіння. Моделювання процесів сушіння нерухомого і рухомого шарів на ЕОМ дозволило отримати результати, що описують кінетику сушіння товстого шару матеріалу за його глибиною. Порівняльна оцінка одержаних результатів двох режимів сушіння: без перемішування і з перемішуванням, дозволяє зробити висновок про доцільність перемішування матеріалу в процесі сушіння, оскільки, при однакових початкових параметрах сушильного агента, зменшується тривалість сушіння до зазначеної вологості в порівнянні з сушінням стаціонарного шару, підвищується рівномірність сушіння усього об'єму матеріалу, що забезпечує вищу якість висушеного матеріалу. Подальші дослідження, пов'язані з встановленням взаємозв'язку між коефіцієнтами, що характеризують інтенсивність перемішування в запропонованій моделі і конструктивними, режимними параметрами робочих органів для перемішування, дозволять обґрунтувати раціональні параметри сушарки, досягнути максимальної ефективності сушіння від застосування процесу перемішування.

1. Санін А.А. Технологія возделывания льна масличного в зоне Среднего Поволжья. Рекомендации / А.А. Санін, Л.А. Косых. – Кинель, 2006.
2. Лыков А. В. Теория сушки / А. В. Лыков – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
3. Котов Б.И. Технологические и теплоэнергетические основы повышения эффективности сушки растительного сырья: Дис...д-ра техн. наук: 05.20.01 / УААН, Ин-т механизации и электрификации с.х. / Борис Иванович Котов. – Глеваха, 1994. – 440 с.
4. Дідух В.Ф. Підвищення ефективності сушіння сільськогосподарських матеріалів: Монографія / Володимир Федорович Дідух. – Луцьк: ЛДТУ, 2002. – 165 с.
5. Пат. № 69227 Україна, МПК (2006) F26 B17/12, F26 B17/18. Сушарка для сипких матеріалів / Ящук А.А., Кірчук Р.В., Дідух В.Ф. Заявник і власник патенту Луцький національний технічний університет.; заявл. 26.09.2011.; опубл. 25.04.2012, бюл. № 8.
6. Mujumdar M.S. – Handbook of Industrial Drying / M. S. Mujumdar. – 3 ed. – CRC Press, 2006.
7. Методические рекомендации по математическому моделированию процесса сушки и охлаждения зерна в установках плотного слоя. – М., 1985.
8. Малин Н. И. Энергосберегающая сушка зерна / Н.И. Малин. – М.: Колос, 2004. – 240 с.
9. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб пособие для вузов / В.Е. Гмурман. – 9-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2003. – 479 с.