

УДК 631.365:633.521

© І.М. Дударев, к.т.н.; С.С. Голячук, к.с.-г.н.,
Луцький національний технічний університет

АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ СУШАРОК СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

У статті розглянуті особливості конструкцій сушарок сипких матеріалів та здійснено їх аналіз за конструктивними параметрами. На основі проведеного аналізу запропоновано конструкцію сушарки складових лляного вороху.

СУШАРКА, КОНСТРУКЦІЯ, ПАРАМЕТРИ, ЛЛЯНИЙ ВОРОХ.

Постановка проблеми. Сушіння рослинних матеріалів є енергоємним процесом, що в умовах постійного подорожчання енергоресурсів призводить до відмови від нього в господарствах. Як наслідок, неможливість збирання та переробки врожаю за несприятливих погодних умов та значні його втрати. Знизити витрати на процес можна ефективніше використовуючи сушильний агент та збільшуючи продуктивність сушарок. Досягнути поставлену мету можна за рахунок удосконалення існуючих та розробки нових зразків сушильної техніки, обґрунтовуючи їх раціональні конструктивні та технологічні параметри.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичними та експериментальними дослідженням сушіння рослинної сировини займалися А.С. Гінзбург, В.Ф. Дідух, Р.В. Кірчук, Б.І. Котов, О. Крішер, А.В. Ликов, С.Г. Панасюк, А.В. Спірін, В.П. Чеботарьов та інші науковці [1, 2]. Науковцями проведено глибокий аналіз факторів, що впливають на перебіг процесу сушіння, досліджено фізико-механічні та аеродинамічні властивості рослинної сировини як об'єкта сушіння, обґрунтовано енергоощадні способи і режими сушіння з врахування властивостей матеріалу, запропоновано низку конструкцій сушарок, що дозволяють реалізувати ці способи та режими, а також забезпечують зниження енергоємності та скорочення тривалості процесу з одночасним рівномірним просушуванням матеріалу. Разом з тим, складові лляного вороху, як об'єкти сушіння, потребують врахування їх властивостей під час розробки конструкцій сушильного обладнання, тому подальші дослідження у цьому напрямку є актуальними.

Мета дослідження – проаналізувати відомі конструкції сушарок сипких матеріалів та обґрунтувати конструкцію сушарки складових лляного вороху.

Результати дослідження. До особливостей конструкцій сушарок, які впливають на процес сушіння, можна віднести: наявність робочих органів, що активують сушіння (лопаті, гвинти, спіралі та ін.); спосіб підведення та відведення сушильного агента; об'єм матеріалу, що одночасно може перебувати в сушарці, зокрема, важлива висота шару матеріалу через який проходить сушильний агент, що не може перевищувати величини зони сушіння, оскільки в протилежному випадку частина матеріалу буде пересушуватися, а частина недосушуватися; стан матеріалу під час сушіння (рухомий, нерухомий, псевдорозріджений та ін.); можливість регулювання режиму сушіння в залежності від параметрів матеріалу.

Сушіння насіння льону та насінневого вороху (сипкий матеріал) здійснюють у щільному квазірухомому (незначна швидкість переміщення матеріалу) шарі або розпушеному шарі. Для сушіння сипкого матеріалу у щільному квазірухомому шарі застосовують бункери для вентиляювання різної форми, а також шахтні та жалюзійні сушарки. Для сушіння сипкого матеріалу у розпушеному або тонкому шарі застосовують каскадні, тарілчасті, карусельні, вібраційні, стрічкові, шнекові, спіральні, поршневі та барабанні сушарки. Аналіз існуючих конструкцій та патентний пошук показали, що основним недоліком сушарок матеріалу у щільному квазірухомому шарі є малорухомість матеріалу, його ущільнення під власною вагою, що зумовлює нерівномірне вентиляювання матеріалу, а, відповідно, його сушіння. Основним недоліком відомих конструкцій засобів сушіння матеріалу у розпушеному стані є неповне використання об'єму сушильної камери, що спричиняє зниження продуктивності, та нераціональне використання сушильного агента. Крім того, мають місце значні енерговитрати на привод камер сушіння та робочих органів сушарок. До недоліків необхідно також віднести і те, що способи сушіння, які реалізовані у відомих конструкціях засобів сушіння, є енергоємними, оскільки не забезпечують оптимальних температурних режимів сушіння. Таким чином, існує необхідність у розробці нових засобів сушіння, які б усували зазначені недоліки.

У таблиці представлені конструкції сушарок, які можуть використовуватися для сушіння насіння льону та інших сипких матеріалів. Проаналізуємо конструктивні схеми сушарок з метою вибору найбільш раціональної конструкції, яка б забезпечувала ефективне та рівномірне сушіння матеріалу з мінімальними енерговитратами на процес. Для аналізу сушарок виберемо наступні конструктивні параметри: x_1 – вид камери сушіння (рухома, нерухома); x_2 – наявність конструктивних елементів (робочих органів),

що інтенсифікують сушіння шляхом різних дій на матеріал (перемішування, розпушування, пересипання та ін.) або це зумовлено формою чи рухом сушильної камери; x_3 – наявність у конструкції спеціальних транспортуючих робочих органів для матеріалу; x_4 – наявність у конструкції повітророзподільної системи, що забезпечує розподіл сушильного агента у шарі матеріалу для рівномірного сушіння (однакову інтенсивність вентиляювання матеріалу за об’ємом); x_5 – ступінь заповнення об’єму сушильної камери матеріалом.

Для характеристики конструктивних параметрів скористаємося булевими змінними, що можуть приймати два значення “0” та “1”. Прийнемо, що якщо конструктивний елемент сушарки чинить позитивний вплив на процес сушіння та знижує його енергоємність, тоді параметру, що характеризує цей конструктивний елемент, присвоюється значення “1”. Якщо ж конструктивний елемент сушарки чинить негативний вплив на процес сушіння, тоді параметру, що його характеризує, присвоюється значення “0”. Таким чином, для найбільш раціональної конструкції сума булевих змінних, що характеризують вказані параметри, має бути максимальною:

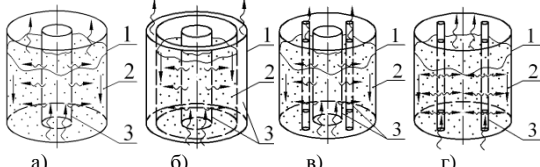
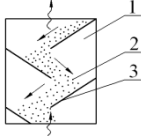
$$S(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = \sum_{i=1}^n x_i \rightarrow \max, \quad (1)$$

де x_i – i -й конструктивний параметр; n – кількість конструктивних параметрів.

Таблиця – Схеми сушарок та їх характеристики

№ з/п	Схема та особливості конструкції сушарки	Параметри конструкції x_i та їх сума S
1	<div style="text-align: center;">  <p>а) б) в)</p> <p>Бункери для вентиляювання, що призначені для сушіння сипкого матеріалу у щільному квазірухомому шарі, які виконані у формі: а) паралелепіпеда; б) циліндра; в) конуса (1 – бункер; 2 – сипкий матеріал).</p> </div>	<p style="text-align: center;">3</p> <p>$x_1 = 1;$ $x_2 = 0;$ $x_3 = 1;$ $x_4 = 0;$ $x_5 = 1;$ $S = 3$</p>

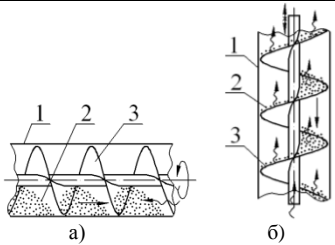
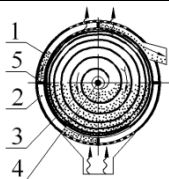
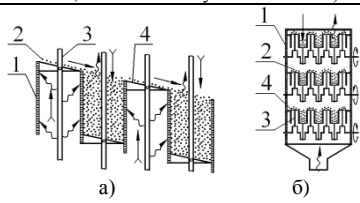
Продовження табл.

1	2	3
2	 <p>Бункери для вентилявання у формі циліндра з повітророзподільною системою (каналами для підведення та відведення сушильного агента (далі СА)), зокрема: а) з центральним вентиляційним каналом; б) з підведенням СА через центральний вентиляційний канал та відведенням через периферійний; в) з підведенням СА через центральний вентиляційний канал та відведенням через периферійні трубчасті канали; г) з підведенням СА через трубчасті вентиляційні канали (1 – бункер; 2 – сипкий матеріал; 3 – повітророзподільна система)</p>	$x_1 = 1;$ $x_2 = 0;$ $x_3 = 1;$ $x_4 = 1;$ $x_5 = 1;$ $S = 4$
3	 <p>Шахтна сушарка для сушіння сипкого матеріалу у щільному квазірухомому шарі (1 – сушильна камера; 2 – сипкий матеріал; 3 – короби для підведення та відведення СА)</p>	$x_1 = 1;$ $x_2 = 0;$ $x_3 = 1;$ $x_4 = 1;$ $x_5 = 1;$ $S = 4$
4	 <p>Жалюзійні сушарки для сушіння сипкого матеріалу у щільному квазірухомому шарі: а) жалюзі нерухомі; б) жалюзі рухомі (1 – сушильна камера; 2 – сипкий матеріал; 3 – жалюзі)</p>	$x_1 = 1;$ $x_2 = 0$ (а); $x_2 = 1$ (б); $x_3 = 1;$ $x_4 = 0;$ $x_5 = 1$ (а); $x_5 = 0$ (б); $S = 3$
5	 <p>Каскадна сушарка для сушіння сипкого матеріалу у розпушеному шарі, що створюється внаслідок пересипання матеріалу під власною вагою з полиць на полицю (1 – сушильна камера; 2 – сипкий матеріал; 3 – каскад спрямовуючих полиць)</p>	$x_1 = 1;$ $x_2 = 1;$ $x_3 = 1;$ $x_4 = 0;$ $x_5 = 0;$ $S = 3$

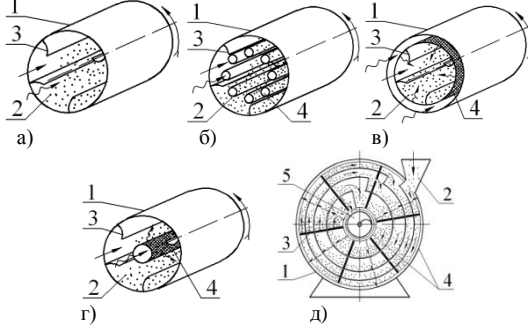
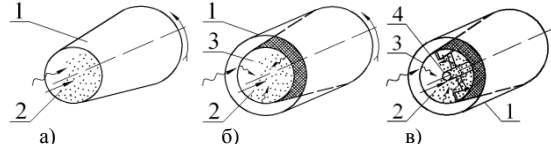
Продовження табл.

1	2	3
6	 <p>Тарілчаста сушарка для сушіння сипкого матеріалу у розпушеному шарі, що створюється за рахунок обертального руху тарілок (1 – сушильна камера; 2 – сипкий матеріал; 3 – тарілки)</p>	$x_1 = 1;$ $x_2 = 1;$ $x_3 = 1;$ $x_4 = 0;$ $x_5 = 0;$ $S = 3$
7	 <p>Карусельні сушарки для сушіння сипкого матеріалу у розпушеному шарі, що створюється за рахунок обертання елементів конструкції: а) з рухомими дисками; б) з нерухомими дисками (1 – сушильна камера; 2 – сипкий матеріал; 3 – лопаті; 4 – вентилятор)</p>	$x_1 = 0$ (а); $x_1 = 1$ (б); $x_2 = 1;$ $x_3 = 1;$ $x_4 = 0;$ $x_5 = 0;$ $S = 2$ (а); $S = 3$ (б)
8	 <p>Вібраційна сушарка для сушіння сипкого матеріалу у розпушеному шарі (1 – вібраційна основа сушильної камери; 2 – сипкий матеріал)</p>	$x_1 = 0;$ $x_2 = 1;$ $x_3 = 1;$ $x_4 = 0;$ $x_5 = 0;$ $S = 2$
9	 <p>Стрічкова сушарка у якій сипкий матеріал у тонкому шарі переміщується стрічковими транспортерами, що розміщені на декількох ярусах сушильної камери (1 – сушильна камера; 2 – сипкий матеріал; 3 – стрічкові транспортери).</p>	$x_1 = 1;$ $x_2 = 1;$ $x_3 = 0;$ $x_4 = 0;$ $x_5 = 0;$ $S = 2$

Продовження табл.

1	2	3
10	 <p>Шнекові сушарки у яких переміщення сипкого матеріалу сушильною камерою здійснюється за допомогою шнека: а) горизонтальний шнек, що здійснює обертальний рух; б) вертикальний шнек через який підводиться СА, що здійснює коливний рух (1 – сушильна камера; 2 – матеріал; 3 – шнек)</p>	$x_1 = 1;$ $x_2 = 1;$ $x_3 = 0$ (а); $x_3 = 1$ (б); $x_4 = 0$ (а); $x_4 = 1$ (б); $x_5 = 0;$ $S = 2$ (а); $S = 4$ (б)
11	 <p>Спіральна сушарка в якій сипкий матеріал у процесі сушіння ковзає витками спіралеподібної поверхні (1 – сушильна камера; 2 – матеріал; 3 – спіралеподібна поверхня; 4 – завантажувальний шнек; 5 – вивантажувальні лопаті)</p>	$x_1 = 1;$ $x_2 = 1;$ $x_3 = 0;$ $x_4 = 0;$ $x_5 = 0;$ $S = 2$
12	 <p>Поршнева сушарка у якій сипкий матеріал періодично пересипається з комірки в комірку, що утворюються зворотно-поступальним рухом полицок (поршнями): а) з ступінчастим розміщенням комірок; б) з ярусним розміщенням комірок (1 – сушильна камера; 2 – сипкий матеріал; 3 – привод полицок; 4 – полицки)</p>	$x_1 = 1;$ $x_2 = 1;$ $x_3 = 1;$ $x_4 = 1;$ $x_5 = 0;$ $S = 4$

Продовження табл.

1	2	3
13	 <p>Барабанні сушарки з рухомою або нерухомою горизонтально розміщеною циліндричною сушильною камерою, в окремих конструкціях сушарок передбачено можливість зміни кута встановлення барабана, а розпушування сипкого матеріалу відбувається за рахунок його постійного пересипання в барабані за допомогою полицок, лопатей, гвинтових навівок та інших конструктивних елементів: а) з підведенням СА безпосередньо в рухому сушильну камеру; б) з підведенням СА через перфоровані труби, що розміщені вздовж рухомої сушильної камери; в) з підведенням СА через кільцевий канал на периферії рухомої сушильної камери; г) з підведенням СА у рухому сушильну камеру через осьовий (центральный) канал; д) з підведенням СА у нерухому сушильну камеру через осьовий (центральный) канал та відведенням через периферійний кільцевий канал або навпаки (1 – сушильна камера; 2 – сипкий матеріал; 3 – полицки, лопаті, гвинтові навівки; 4 – повітророзподільна система (канали); 5 – шнек)</p>	$x_1 = 0$ (а, б, в, г); $x_1 = 1$ (д); $x_2 = 1$; $x_3 = 1$; $x_4 = 0$ (а); $x_4 = 1$ (б, в, г, д); $x_5 = 0$ (а, б, в, г); $x_5 = 1$ (д); $S = 2$ (а); $S = 3$ (б, в, г); $S = 5$ (д)
14	 <p>Барабанні сушарки з горизонтально розміщеною конічною сушильною камерою в яких сипкий матеріал переміщується та пересипається вздовж сушильної камери внаслідок її форми та обертання або у випадку нерухомого барабана за рахунок лопатей, що здійснюють обертальний рух: а) сушильна камера рухома з підведенням СА безпосередньо в камеру; б) сушильна камера рухома з підведенням СА через кільцевий периферійний канал; в) сушильна камера нерухома з підведенням СА через кільцевий периферійний канал, конструкція обладнана валом з лопатями (1 – сушильна камера; 2 – сипкий матеріал; 3 – перфорований кінцевий барабан; 4 – вал з лопатями)</p>	$x_1 = 0$ (а, б); $x_1 = 1$ (в); $x_2 = 1$; $x_3 = 1$; $x_4 = 0$ (а); $x_4 = 1$ (б, в); $x_5 = 0$; $S = 2$ (а); $S = 3$ (б); $S = 4$ (в)

Умовні позначення:

- ← — напрямок руху матеріалу;
- ← ~ — напрямок руху сушильного агента;
- ← < — напрямок руху конструктивних елементів

Відповідно до вищезазначеного матимемо:

1) якщо камера сушіння рухома, тоді $x_1 = 0$, якщо нерухома – $x_1 = 1$, це пояснюється тим, що на привод камери сушіння з матеріалом необхідні додаткові енерговитрати;

2) якщо в конструкції сушарки передбачені робочі органи для перемішування, розпушування чи пересипання матеріалу або це зумовлено формою чи рухом сушильної камери, що сприяє інтенсифікації сушіння, тоді $x_2 = 1$, у протилежному випадку – $x_2 = 0$;

3) якщо в конструкції сушарки передбачені транспортери, конвеєри чи інші транспортуючі елементи (робочі органи), до функції яких входить лише переміщення матеріалу сушаркою, то їх наявність збільшує металомісткість конструкції, ускладнює її привод та призводить до зростання енергоємності процесу сушіння, відповідно, за наявності таких конструктивних елементів $x_3 = 0$, у випадку відсутності – $x_3 = 1$;

4) якщо в конструкції сушарки передбачена повітророзподільна система через яку відбувається вентилявання матеріалу з однаковою інтенсивністю за усім його об'ємом, що сприяє рівномірному сушінню та раціональному використанню сушильного агента, тоді $x_4 = 1$, у випадку відсутності такої системи в конструкції сушарки – $x_4 = 0$;

5) чим вищий ступінь заповнення об'єму сушильної камери сушарки за умови забезпечення інтенсивного та рівномірного сушіння матеріалу, тим вища продуктивність сушарки, тому приймаємо, якщо ступінь заповнення об'єму сушильної камери $< 50\%$, тоді $x_5 = 0$, якщо ж ступінь заповнення $\geq 50\%$ – тоді $x_5 = 1$; разом з тим необхідно зазначити, що при збільшенні ступеня заповнення об'єму камери сушіння, зростає висота шару матеріалу, ускладнюється його вентилявання (зростає опір шару матеріалу повітряному потоку) та можливість перемішування, розпушування, пересипання і інших дій, які б сприяли інтенсифікації сушіння та рівномірному сушінню матеріалу.

Здійснивши аналіз конструкцій сушарок у зазначений спосіб встановлено, що конструкція №13 (д) (див. таблицю) має найбільшу суму $S=5$, але разом із тим є металомісткою та має значні енерговитрати на привод робочих органів (лопаток). Крім того, сушарка має складну схему переміщення матеріалу, а також нерівномірний його розподіл у сегментах барабана, що зумовлює нерівномірність сушіння матеріалу.

У конструкціях №2 (а, б, в, г) та №3 (див. таблицю), що набрали суму $S=4$, недоліком є відсутність перемішування чи інших способів дії на матеріал, які б інтенсифікували його сушіння, натомість сушіння відбувається в товстому квазірухомому шарі, який з незначною швидкістю переміщується під власною вагою внаслідок відбору знизу сушильної камери просушених елементарних шарів матеріалу. Такий спосіб сушіння матеріалу є енергоємним та не забезпечує рівномірне сушіння матеріалу навіть за наявності повітродозподільної системи, оскільки в камері сушіння утворюються зони з різною інтенсивністю вентилявання матеріалу, що зумовлено ущільненням матеріалу у нижній частині камери сушіння під вагою верхніх шарів матеріалу. Крім того, внаслідок геометричних розмірів насіння льону з нього утворюється щільний шар, що ускладнює його вентилявання, тому сушіння насіння льону у товстому шарі малоефективне.

Конструкції №10 (б) та №12 (а, б) (див. таблицю), які мають суму $S=4$, хоча і забезпечують рівномірне просушування матеріалу, але є металомісткими та енергоємними, що обумовлено наявністю значної кількості рухомих робочих органів (шнек, полички) та складним їх приводом.

У конструкції №14 (в) (див. таблицю), що також має суму $S=4$, за рахунок встановлення активаторів (лопатеї) передбачено постійне перемішування та пересипання матеріалу, що забезпечує його рівномірне і інтенсивне сушіння. Разом із тим, недоліком цієї конструкції є низький ступінь заповнення об'єму камери сушіння матеріалом. Збільшувати висоту шару матеріалу у цій конструкції не рекомендується, тому що буде ускладнено роботу активаторів та зросте опір шару повітряному потоку. Тому доцільно збільшити ступінь заповнення об'єму камери сушіння за рахунок конструктивного її зменшення. Для цього пропонується виконати камеру сушіння у вигляді напівконуса та замінити обертальний рух активаторів коливним. Із врахуванням усього зазначеного на основі конструкції №14 (в) (див. таблицю) може бути запропонована конструкція сушарки для сушіння складових лляного вороху (вільного насіння льону, насінневих коробочок льону) та інших сипких матеріалів (рис.) [3], що має низьку металомісткість та енергоємність, але при цьому забезпечує рівномірне просушування матеріалу. Ця конструкція забезпечує одночасне сушіння як вільного насіння льону, так і насіння, отриманого після площення насінневих коробочок.

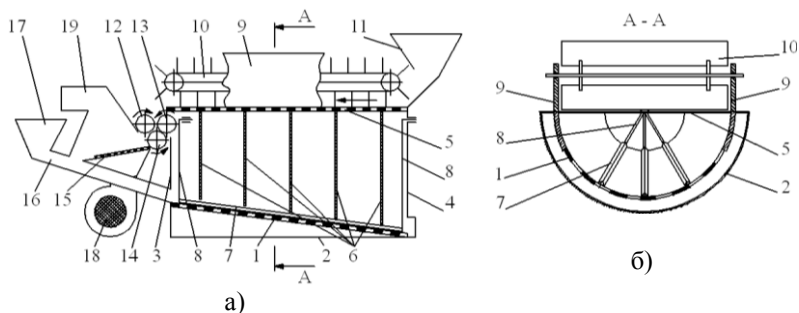


Рис. – Сушарка складових льяного вороху (1 – перфороване днище; 2 – кожух; 3, 4 – торцеві кришки; 5 – плоске перфороване днище; 6 – перегородки; 7 – активатор; 8 – коромисла; 9 – боковини; 10 – транспортер; 11 – бункер насінневих коробочок; 12, 13, 14 – пневматичні барабани; 15 – перфорована пластина; 16 – завантажувальний канал; 17 – бункер насіння; 18 – вентилятор; 19 – вловлювач): а) сушарка; б) переріз сушарки; в) активатор

Висновок. На основі аналізу конструкцій сушарок сипких матеріалів запропоновано сушарку складових льяного вороху (насіння, насінневі коробочки), що має низьку металомісткість та енергоємність, але при цьому забезпечує рівномірне просушування матеріалу.

Література

1. Гинзбург А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов / А.С. Гинзбург. – М.: Пищевая промышленность, 1973. – 528 с.
2. Кришер О. Научные основы техники сушки / О. Кришер; пер. с нем. Д.М. Левина; под ред. А.С. Гинзбурга. – М.: Издательство иностранной лит., 1961. – 535 с.
3. Пат. № 44977 Україна, МПК F26 В17/00. Сушарка / І.М. Дударев. Заяв. 17.04.2009; опубл. 26.10.2009; Бюл. № 20.

Рецензент д.т.н., проф. В.Ф. Дідух