

УДК 532.72; 669.015.23

В.С. ТРУШ

Львівський центр Інституту космічних досліджень  
НАН України та НКАУ

## АКУСТИЧНИЙ СПОСІБ СУШІННЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

© Труш В., 2006

*Розглянуто основні принципи видалення вологи із матеріалів акустичним способом. Наведено розрахунки з впливу параметрів звукового поля на процес сушіння. Показано, що найбільш ефективним є застосування звукового діапазону акустичних хвиль.*

*The basic principles of moisture deleting by acoustic method from any materials are considered in this article. The calculations of acoustic field parameters influence on drying process are resulted. The larger efficiency of sound range acoustic waves is shown.*

Акустичні технології є перспективним відгалуженням від вібротехнологій.

В акустичних технологіях, як правило, кінетична енергія передається до оброблюваних матеріалів дією на них потужних акустичних хвиль. Це зумовлює ширші можливості акустичних технологій у виборі параметрів хвиль (зокрема, частоти та амплітуди) і відкриває нові технологічні можливості. У цій роботі розглянуто один із технологічних напрямків – акустичне сушіння сипких матеріалів

Процес сушіння, який полягає у видаленні вологи з матеріалів, з одного боку, є одним із етапів різних технологічних процесів, з іншого, – одним із найенерговитратніших стадій обробки матеріалів. Якість і швидкість висушених продуктів сушіння значною мірою визначають якість і собівартість кінцевих продуктів.

Сьогодні в промисловості застосовують різноманітні способи сушіння сипких матеріалів [1–3]. Завдання залишилися незмінними: збільшення швидкості сушіння, зниження енерговитрат та максимальне збереження споживчих та товарних якостей висушуваного матеріалу.

Найпоширеніший спосіб – це конвективно-термічний [1–3].

Суть конвективно-термічного способу полягає у тому, що до висушуваного матеріалу підводять теплоносії: підігріте повітря, пару або продукти згоряння палива (залежно від виду висушуваного матеріалу). За рахунок градієнтів температур та вологості сушильного агента по відношенню до навколишнього повітря волога із внутрішніх шарів дифундує до зовнішньої поверхні, де випаровується і виноситься із сушильної камери. В перший період сушіння, коли вологість матеріалу доволі велика, то і швидкість сушіння – велика. Це зумовлено тим, що волога, яка прибула з внутрішніх шарів, заміщає вологу, яка випарувалася з вільної поверхні. За жорсткого процесу сушіння другий період, коли вологовміст матеріалу різко спадає до певного значення, виникає значна різниця вологовмісту і температури зовнішніх і внутрішніх шарів матеріалу. Це призводить до утворення внутрішніх напружень і навіть до руйнування структури матеріалу, а також погіршення його споживчих та товарних якостей.

Крім того, сушіння матеріалів з видалення вологи конвективно-термічним способом потребує великого енергоспоживання, відбувається тривалий час і часто перебігає з високим рівнем браку через перегрівання чи нерівномірне висушування матеріалу.

Тому, враховуючи значне зростання цін на всі види енергії, а також необхідність вдосконалення процесів сушіння, виникла потреба в розробці альтернативних способів сушіння.

Таким альтернативним способом вважають сушіння матеріалів в потужних акустичних полях. Згідно з матеріалами патентної та науково-технічної літератури [4–11], а також сучасних розробок фірм [7] акустичний спосіб сушіння є найпрогресивнішим.

**Постановка проблеми.** Існуючі сьогодні акустичні способи сушіння [4–12] дають змогу обробляти невеликі об'єми висушеного матеріалу. Сучасний розвиток в галузі технології сушіння потребує одночасної обробки великих об'ємів. Тому характеристика впливу акустичного поля великої потужності з вибором оптимального діапазону частот звуку для обробки великих об'ємів висушеного матеріалу є доволі актуальною і потребує розгляду.

**Аналіз останніх досліджень.** Літературні джерела [4–12] інформують про застосування потужного акустичного поля для сушіння невеликих об'ємів сипкого матеріалу, а також дають коротку характеристику впливу цього поля на процес сушіння. Розглянемо деякі особливості акустичного сушіння.

Основна цінність акустичного методу сушіння матеріалів полягає у тому, що сушіння відбувається без істотного підвищення температури висушеного матеріалу (так зване „холодне сушіння”), під час застосування ультразвукових генераторів, що уможливує висушувати термолабільні матеріали (наприклад, бобові культури, фрукти, овочі, ферменти, лікарські препарати) [4].

Швидкість процесу сушіння порівняно з іншими способами, які використовуються на практиці, вища у 2–5 разів [4–7], відповідно зменшуються енерговитрати на процес сушіння.

Акустичне сушіння дає змогу досушувати продукти практично до нульової вологості, причому матеріали із великим початковим вологовмістом.

При цьому зберігається висока якість висушеної продукції (95–98 % корисних речовин), а також забезпечується висока рівномірність просушування матеріалів.

Акустичний спосіб сушіння забезпечує екологічну чистоту оброблюваних матеріалів.

Процес передачі кінетичної енергії потужних акустичних хвиль шару сипкого матеріалу можна змоделювати як дію вимушуючої знакозмінної сили на пружно-в'язку систему. Але поряд з аналогією дії звуку і вібрацій на пружно-в'язку систему, у разі застосування потужних акустичних хвиль мають місце додаткові фактори, які інтенсифікують технологічні процеси, наприклад, сушіння сипких матеріалів.

Розглянемо їх.

Акустичні хвилі високої інтенсивності сприяють зменшенню величини дифузійного пограничного шару, завдяки чому в акустичному полі гідродинамічний пограничний шар може бути істотно менший від дифузійного. Звукові хвилі проникають всередину дифузійного шару, турбулізують його і тим самим пришвидшують процес випаровування.

Під час розповсюдження звукової хвилі вздовж поверхні матеріалу створюються фази розрідженого та підвищеного тиску [4]. В момент проходження фази стиску в капілярах створюється надлишковий тиск, а в зоні розрідження створюється частковий вакуум, в результаті чого швидкість випаровування зростає.

Радіаційний тиск, зумовлений дією акустичного поля, перевищує різницю між тиском насиченої пари, яка виділяється із частинок матеріалу, і парціальним тиском у навколишньому середовищі. Тому цей тиск видаляє рідину з капілярів частинок назовні (звукокапілярний ефект), що значно пришвидшує процес сушіння.

У капілярних системах матеріалу під дією звуку з певними характеристиками виникають кавітаційні пухирі, а також відбувається їх пульсація. Такий процес викликає „розрихлення” вологи з подальшим зменшенням в'язкості рідини. Тому волога інтенсивніше рухається до зовнішніх стінок матеріалу капілярами.

Видалення вологи із матеріалу акустичним способом здійснюється не лише за рахунок фазового переходу (випаровування), але і за рахунок перетворення рідини в аерозоль (дрібнодисперсне розпилення).

Згідно з науково-технічною літературою [4, 5] на процес інтенсифікації технологічних процесів, зокрема акустичного сушіння, впливають деякі фактори, що в комплексі забезпечують досягнення бажаного результату. До них можна віднести:

- коефіцієнт затухання хвилі та рівень інтенсивності звукової хвилі на відстані від джерела звуку;
- товщину пограничного шару, який формується під дією звукових хвиль;

- коливну швидкість частинок у плоскій хвилі;
- критерій масообміну (критерій Нуссельта).

**Формулювання мети роботи.** Мета цієї роботи – вибір діапазону частот акустичних хвиль для ефективного сушіння сипких матеріалів, зокрема зернових культур.

**Виклад основного матеріалу.** Розглянемо характер розповсюдження звукової хвилі у трьох ізотропних середовищах: повітрі, воді та шарі сипкого матеріалу.

У цьому випадку розглядатимемо акустичну дію плоских звукових хвиль на процес сушіння сипкого матеріалу. Тому, описуючи розповсюдження хвиль в одному напрямі, можна застосовувати співвідношення, які притаманні для плоскої звукової хвилі.

Температура в усіх трьох середовищах однакова і становить в середньому  $20^{\circ}\text{C}$ , тиск – нормальний. Розрахунки проведемо для хвиль, які лежать в діапазонах: інфразвуку —  $0,1 \dots 16$  Гц, звуковому —  $25 \dots 1025$  Гц, ультразвуковому —  $16000 \dots 36000$  Гц.

Відомо, що інтенсифікація технологічних процесів із застосуванням звуку можлива за використання рівня інтенсивності звуку не менше ніж 140 дБ. Існуючі генератори звуку за літературою [11] дають змогу досягти випромінення звуку інтенсивністю до 175 дБ на ультразвукових діапазонах. Для практичного розрахунку параметрів звукових хвиль, які розповсюджуються в різних середовищах, умовно приймаємо 160 дБ.

Важливим параметром звуку є довжина хвилі, тому проведемо відповідний розрахунок.

Довжина хвилі визначається за формулою

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (1)$$

де,  $f$  – частота хвилі, Гц;  $c$  – швидкість звуку в середовищі, м/с: у повітрі становить 340 м/с, у воді – 1485 м/с; температура в усіх трьох середовищах однакова і становить в середньому  $20^{\circ}\text{C}$ ; тиск – 760 мм рт. ст. [14].

Літературних даних про величину швидкості розповсюдження у зерновому матеріалі не знайдено. Для знаходження швидкості розповсюдження звуку у зерновому шарі пшениці вважатимемо зерновий шар як пористе тіло з повітряними порами певної концентрації. Частка повітряних пор за [3] становить 20 %. Згідно з [15] швидкість звуку в такому матеріалі можна визначити за формулою (2)

$$c = c_T \cdot \sqrt{1 - P^{2/3}}, \quad (2)$$

де  $c$  – швидкість звуку в зерновому матеріалі, м/с;  $c_T$  – швидкість звуку у твердій фазі матеріалу, м/с;  $P$  – об'ємна пористість матеріалу.

Підставляючи дані у формулу (2), отримаємо

$$c = 774 \cdot \sqrt{1 - 0,2^{2/3}} = 627,849 \approx 628 \text{ м/с.}$$

Результати розрахунків довжин хвиль заносимо у табл. 1.

Таблиця 1

Довжина хвилі

Частота звуку, Гц	0,1	5,5	10	16,3	25	225	625	1025	16000	24000	30000	36000
Довжина хвилі, м	3400	61,818	34	20,859	13,6	1,511	0,544	0,332	0,021	0,014	0,011	0,009

Для створення плоскої хвилі поперечні розміри звукопроводу повинні бути менші від довжини хвилі. Тому, враховуючи дані табл. 1, можна зробити висновок, що для інтенсифікації технологічних процесів плоскі ультразвукові хвилі мають локальний фронт дії. Починаючи від частоти 1025 Гц і нижче, можна використовувати дію звуку для інтенсифікації технологічних процесів у великих об'ємах.

Фактори, які впливають на природу розповсюдження звукової хвилі: коефіцієнт затухання хвилі та інтенсивність звукової хвилі на відстані від джерела звуку. Знайдемо ці величини. Згідно з [13] коефіцієнт затухання хвилі знаходимо за формулою

$$\alpha = \frac{4}{3} \cdot \frac{(2 \cdot \pi \cdot f)^2}{2 \cdot \rho_0 \cdot c^3} \cdot \mu, \quad (3)$$

де,  $f$  – частота хвилі, Гц;  $\rho_0$  – густина середовища: повітря – 1,29 кг/м<sup>3</sup>, води – 1000 кг/м<sup>3</sup>, зерна – 1400 кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – в'язкість середовища: для повітря — 1,82·10<sup>-5</sup>Па·с [14], для води — 1·10<sup>-3</sup> Па·с [14], для шару зерна пшениці — 80·10<sup>3</sup> Па·с [15].

Згідно з [13] рівень інтенсивності звуку на відстані  $x$  від джерела звуку знаходимо за формулою

$$I = I_0 \cdot e^{-2 \cdot \alpha \cdot x}, \quad (4)$$

де  $I_0$  – рівень інтенсивності джерела звуку, дБ;  $\alpha$  – коефіцієнт затухання;  $x$  – відстань від джерела звуку, м.

Результати обчислень наведено у табл. 2, 3 та 4.

Таблиця 2

**Рівень інтенсивності звуку на відстані від джерела звуку в повітрі залежно від коефіцієнта затухання**

Частота звуку, Гц	Коефіцієнт затухання звукової хвилі	Рівень інтенсивності звуку дБ на відстані від джерела звуку $x$					
		$x=0$	$x=1$	$x=10$	$x=100$	$x=1000$	$x=10000$
0,1	$9,438 \cdot 10^{-14}$	160	159,999	159,999	159,999	159,999	159,999
5,5	$2,855 \cdot 10^{-10}$	160	159,999	159,999	159,999	159,999	159,999
10	$9,438 \cdot 10^{-10}$	160	159,999	159,999	159,999	159,999	159,999
16,3	$2,508 \cdot 10^{-9}$	160	159,999	159,999	159,999	159,999	159,999
25	$5,899 \cdot 10^{-9}$	160	159,999	159,99	159,998	159,998	159,981
225	$4,778 \cdot 10^{-7}$	160	159,999	159,998	159,985	159,847	158,478
625	$3,687 \cdot 10^{-6}$	160	159,998	159,988	159,882	158,825	148,627
1025	$9,916 \cdot 10^{-6}$	160	159,966	159,968	159,683	156,858	131,218
16000	$2,416 \cdot 10^{-3}$	160	159,228	152,452	98,687	1,275	0
24000	$5,436 \cdot 10^{-3}$	160	158,269	143,516	53,943	$3,035 \cdot 10^{-3}$	0
30000	$8,494 \cdot 10^{-3}$	160	157,304	135,002	29,264	$6,703 \cdot 10^{-6}$	0
36000	$12 \cdot 10^{-3}$	160	156,133	125,279	13,858	$3,802 \cdot 10^{-9}$	0

Згідно з даними, наведеними в табл. 2, 3 та 4, можна зробити висновок про неможливість використання інфразвукових хвиль через незначну величину коефіцієнта затухання, що, своєю чергою, пов'язано із неможливістю звукоізоляції обладнання. Виявлено шкідливу дію інфразвукових хвиль на мозок та серцево-судинну систему людини.

Ультразвуковий діапазон хвиль дає змогу обробляти матеріали незначних об'ємів і на невеликій відстані від джерела звуку. Так, наприклад, на частоті 16 кГц у сипкому матеріалі на відстані від джерела звуку 0,01 м рівень інтенсивності звуку становить лише  $5,857 \cdot 10^{-7}$  дБ.

Таблиця 3

**Рівень інтенсивності звуку на відстані  
від джерела звуку у воді залежно від коефіцієнта затування**

Частота звуку, Гц	Коефіцієнт затування звукової хвилі	Рівень інтенсивності звуку дБ на відстані від джерела звуку $x$					
		$x=0$	$x=1$	$x=10$	$x=100$	$x=1000$	$x=10000$
0,1	0	160	159,999	159,999	159,999	159,999	159,999
5,5	$2,429 \cdot 10^{-13}$	160	159,999	159,999	159,999	159,999	159,999
10	$8,029 \cdot 10^{-13}$	160	159,999	159,999	159,999	159,999	159,999
16,3	$2,133 \cdot 10^{-12}$	160	159,999	159,999	159,999	159,999	159,999
25	$3,77 \cdot 10^{-7}$	160	159,999	159,999	159,999	159,998	159,987
225	$3,054 \cdot 10^{-7}$	160	159,999	159,999	159,991	159,902	159,025
625	$2,236 \cdot 10^{-6}$	160	159,999	159,992	159,924	159,247	152,634
1025	$6,636 \cdot 10^{-6}$	160	159,999	159,980	159,797	157,984	140,952
16000	$1,621 \cdot 10^{-3}$	160	159,482	154,895	115,687	6,248	$1,32 \cdot 10^{-12}$
24000	$3,648 \cdot 10^{-3}$	160	158,837	148,741	77,133	0,108	0
30000	$5,7 \cdot 10^{-3}$	160	158,186	142,760	51,167	$1,79 \cdot 10^{-3}$	0
36000	$8,209 \cdot 10^{-3}$	160	157,395	135,776	30,984	$1,187 \cdot 10^{-5}$	0

Таблиця 4

**Рівень інтенсивності звуку на відстані від джерела звуку у сипкому матеріалі  
залежно від коефіцієнта затування**

Частота звуку, Гц	Коефіцієнт затування звукової хвилі	Рівень інтенсивності звуку дБ на відстані від джерела звуку $x$					
		$x=0$	$x=1$	$x=10$	$x=100$	$x=1000$	$x=10000$
0,1	$3,794 \cdot 10^{-8}$	160	159,999	159,999	159,999	159,987	159,879
5,5	$1,148 \cdot 10^{-4}$	160	159,963	159,633	159,369	127,184	7,150
10	$3,794 \cdot 10^{-4}$	160	159,878	158,790	148,308	74,915	0,019
16,3	$1,008 \cdot 10^{-3}$	160	159,677	156,806	130,786	21,308	$2,808 \cdot 10^{-7}$
25	$2,371 \cdot 10^{-3}$	160	159,243	152,589	99,575	1,395	0
225	0,192	160	108,965	3,433	$3,317 \cdot 10^{-15}$	0	0
625	1,482	160	8,257	$2,143 \cdot 10^{-11}$	0	0	0
1025	3,986	160	0,055	0	0	0	0
16000	518,426	160	0	0	0	0	0
24000	$1,166 \cdot 10^3$	160	0	0	0	0	0
30000	$1,823 \cdot 10^3$	160	0	0	0	0	0
36000	$2,625 \cdot 10^3$	160	0	0	0	0	0

**Товщина пограничного шару.** Згідно з [4, 5] під час процесів масопередачі основна зміна концентрації речовин відбувається в тонкому шарі, який безпосередньо дотикається до поверхні розділення фаз. Для інтенсифікації технологічних процесів, зокрема сушіння, зменшують товщину цього пограничного шару, підвищуючи градієнт концентрації у перехідній зоні. Товщина пограничного шару в звуковому полі залежить від частоти звуку і згідно з [16] визначається за формулою

$$h = \sqrt{\frac{2 \cdot \mu}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \rho_0}} \quad (5)$$

Дані розрахунків заносимо у табл. 5.

Таблиця 5

**Товщина пограничного шару**

Частота звуку, Гц	Товщина пограничного шару, м		
	у повітрі	у воді	у шарі зерна
0,1	$6,701 \cdot 10^{-3}$	$1,784 \cdot 10^{-3}$	10,662
5,5	$9,036 \cdot 10^{-4}$	$2,406 \cdot 10^{-4}$	1,438
10	$6,701 \cdot 10^{-4}$	$1,784 \cdot 10^{-4}$	1,066
16,3	$5,249 \cdot 10^{-4}$	$1,390 \cdot 10^{-4}$	0,835
25	$4,238 \cdot 10^{-4}$	$1,128 \cdot 10^{-4}$	0,674
225	$1,413 \cdot 10^{-4}$	$3,761 \cdot 10^{-5}$	0,225
625	$8,477 \cdot 10^{-5}$	$2,257 \cdot 10^{-5}$	0,135
1025	$6,619 \cdot 10^{-5}$	$1,762 \cdot 10^{-5}$	0,105
16000	$1,675 \cdot 10^{-5}$	$4,460 \cdot 10^{-6}$	0,027
24000	$1,368 \cdot 10^{-5}$	$3,642 \cdot 10^{-6}$	0,022
30000	$1,224 \cdot 10^{-5}$	$3,257 \cdot 10^{-6}$	0,019
36000	$1,117 \cdot 10^{-5}$	$3,060 \cdot 10^{-6}$	0,018

Незважаючи на те, що ультразвукові хвилі інтенсивніше руйнують пограничний шар, дія ультразвуку носить локальний характер і не дає змоги обробляти глибинні шари сипкого матеріалу.

**Коливна швидкість частинок у плоскій хвилі.** Згідно з [16] коливну швидкість частинок у плоскій хвилі знаходимо за формулою

$$v = \frac{p}{\rho_0 \cdot c}, \quad (6)$$

де  $v$  – коливна швидкість частинок у середовищі, м/с;  $p$  – звуковий тиск, Н/м (160 Дб становить 2000 Н/м [14]).

Дані розрахунків заносимо у табл. 6.

Таблиця 6

**Коливна швидкість частинок у плоскій хвилі**

Коливна швидкість частинок у плоскій хвилі, м/с		
у повітрі	у воді	у шарі зерна
4,559	$1,347 \cdot 10^{-3}$	$2,278 \cdot 10^{-3}$

За однакового звукового тиску коливна швидкість частинок у шарі зерна приблизно в 2000 разів менша, ніж у повітрі. Але навіть невелика коливна швидкість розповсюдження звукових хвиль призведе до передачі енергії.

Враховуючи велику різницю коливних швидкостей звуку в повітрі і в сипкому матеріалі, можна зробити висновок, що частина кінетичної енергії звукових хвиль передається частинкам сипкого матеріалу, які приводяться в рух та частково нагріваються.

**Критерій масопередачі (критерій Нуссельта).** Критерій масопередачі (критерій Нуссельта) – безрозмірна величина, яка являє собою коефіцієнт масопередачі в звуковому полі, зумовленому взаємодією акустичних потоків, які омивають поверхню сипкого матеріалу. Згідно з [4] критерій масопередачі (критерій Нуссельта) знаходимо за формулою

$$Nu = \sqrt{\frac{2 \cdot p}{\rho_0 \cdot D}}, \quad (7)$$

де  $Nu$  – критерій масопередачі (критерій Нуссельта);  $p$  – інтенсивність, Вт/м<sup>2</sup> (для 160 дБ  $p = 10000$  Вт/м<sup>2</sup>);  $D$  – коефіцієнт теплопровідності Вт/(кг·К): для повітря – 0,034 Вт/(кг·К), для води – 0,58 Вт/(кг·К), для шару зерна – 0,18 Вт/(кг·К).

Дані розрахунків заносимо у табл. 7.

Таблиця 7

### Критерій масопередачі (критерій Нуссельта)

Частота звуку, Гц	Критерій масопередачі (критерій Нуссельта)		
	у повітрі	у воді	у шарі зерна
0,1	$81314 \cdot 10^{-3}$	$338 \cdot 10^{-3}$	$711 \cdot 10^{-3}$
5,5	$10964 \cdot 10^{-3}$	$46 \cdot 10^{-3}$	$96 \cdot 10^{-3}$
10	$8131 \cdot 10^{-3}$	$34 \cdot 10^{-3}$	$71 \cdot 10^{-3}$
16,3	$6369 \cdot 10^{-3}$	$27 \cdot 10^{-3}$	$56 \cdot 10^{-3}$
25	$5143 \cdot 10^{-3}$	$0,21 \cdot 10^{-3}$	$45 \cdot 10^{-3}$
225	$1171 \cdot 10^{-3}$	$7,133 \cdot 10^{-3}$	$15 \cdot 10^{-3}$
625	$1029 \cdot 10^{-3}$	$4,28 \cdot 10^{-3}$	$8,993 \cdot 10^{-3}$
1025	$803 \cdot 10^{-3}$	$3,342 \cdot 10^{-3}$	$7,023 \cdot 10^{-3}$
16000	$203 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$1,777 \cdot 10^{-3}$
24000	$182 \cdot 10^{-3}$	$6,906 \cdot 10^{-4}$	$1,590 \cdot 10^{-3}$
30000	$148 \cdot 10^{-3}$	$6,177 \cdot 10^{-4}$	$1,298 \cdot 10^{-3}$
36000	$136 \cdot 10^{-3}$	$5,639 \cdot 10^{-4}$	$1,185 \cdot 10^{-3}$

Згідно з даними, наведеними в табл. 7, зрозуміло, що найефективніший процес масопередачі проходить за низьких частот.

Відомо, що у шарі сипкого матеріалу є сили в'язкості, які перешкоджають протіканню повітря через пори, за рахунок чого матеріал, зокрема зерно, відбирає частину кінетичної енергії. Чим менший радіус пор і чим їх більше, тим краще поглинаються високі частоти. Згідно з [17] під час проходження ультразвуку через дисперсний матеріал відбувається зниження швидкості ультразвуку за рахунок передачі кінетичної енергії безпосередньо частинкам сипкого матеріалу.

**Висновки.** Проаналізувавши вищенаведені розрахунки та матеріали науково-технічної літератури [4–12], можна зробити такі висновки:

1. Одним із найбільш перспективним способів сушіння матеріалів є акустичне сушіння.
2. Існує нижня границя інтенсивності коливань, за яких відбувається значне підвищення інтенсифікації процесу сушіння в акустичному полі. Згідно з [4, 5] мінімальне значення інтенсивності звуку становить 140 дБ.
3. Швидкість сушіння потужними акустичними полями тим більша, чим вища інтенсивність акустичного випромінювання.

4. Недоліком ультразвуку є локальна дія у зв'язку з великим значенням коефіцієнта затухання звуку, який прямо пропорційний до квадрата частоти коливань. Тому ефективно сушіння на ультразвуковому діапазоні відбувається тільки для тонких шарів.

5. Застосування інфразвукового діапазону високої інтенсивності ускладнюється у зв'язку з забезпеченням звукоізоляції обладнання, а також з негативною дією на організм людини інфразвуку.

6. Найбільш доцільним для застосування акустичного поля високої інтенсивності для інтенсифікації процесу сушіння сипкого матеріалу буде звуковий діапазон частот. Застосування цього діапазону частот уможливує ефективно обробляти значні об'єми висушеного сипкого матеріалу і одночасно забезпечує можливість звукоізоляції обладнання.

7. Акустичні сушарки повинні бути обладнані надійним звуко- та теплоізоляційним захистом. Застосування акустичного способу сушіння доволі утруднене, оскільки рівень звукового тиску за межами акустичної камери має бути в межах норм для комфортної та безпечної роботи обслуговуючого персоналу.

1. Гулич І.С., Пушанко М.М., Орлов Л.О. *Обладнання підприємств переробної та харчової промисловості*. – Вінниця: Нова книга, 2001. – 576 с. 2. Гинзбург А.А. *Сушка пищевых продуктов*. – М.: Пищепромиздат, 1960. 3. Баум А.Е. *Сушка зерна*. – М.: “Колос”, 1963. – 282 с. 4. Борисов Ю.Я., Гынкина Н.М. *Акустическая сушка* // В кн. *Физические основы ультразвуковой технологии. Физика и техника мощного ультразвука* / Под ред. Л.Д. Розенберга. – М., Наука, 1970. – С. 579–641. 5. Кардашов Г.А. *Физические методы интенсификации процессов химической технологии*. – М.: Химия, 1990. – 208 с. 6. Патент США US №4334366 МПК – F26B 005/02, *Sonic energy perforated drum for rotary dryers* / Lockwood; Raymond M. (Palo Alto, CA) / Filed: 24.09.1980. 7. Патент Росії RU МПК<sup>7</sup> F26B5/02, F26B7/00, *Акустикотермический способ сушки материалов* / Глазнев В.Н. Оубл. 10.11.2003. 8. Патент Японії JP №4356683 МПК<sup>7</sup> – F26B17/10, F26B23/02, F26B17/00, F26B23/00, F23C11/04, *Pulse combustion drying apparatus* / Oishi hitoshi, Sato hiroaki, Ideta Tatatomi, Yoshida Hiroshi, Kato Yuzo, Publication data: 10.12.1992. 9. Патент Росії RU №2096683 МПК<sup>6</sup>-F23C11/04, *Теплогенератор на основе пульсирующего горения* / Быченко В.И., Коптев А.А. Оубл. 20.11.1997. 10. Патент Росії RU №2095707, МПК<sup>6</sup> F26B17/12, *Устройство для сушки капиллярно-пористых сыпучих материалов* / Глазнев В.Н. Оубл. 10.11.1997. 11. Патент Росії RU МПК<sup>6</sup> №2062416 F26B5/02, F26B7/00, *Способ акустической сушки капиллярно-пористых материалов* / Глазнев В.Н., Глинский А.Б. Оубл. 20.06.1996. 12. Альт-А-оборудования для сушки, <http://www.altadrying.com/>. 13. Алешкевич В.А., Деденко Л.Г., Караваев В.А. *Механика твердого тела: Лекции*. (<http://nature.web.ru/db/msg.html?mid=1175042&uri=page28.html#nk5-6>). 14. Кухлинг Х. *Справочник по физике*. – М.: Мир, 1982. 15. Фисинин В. *По тропам, проложенным учеными* // Журнал “Животноводство России”. – 2003. – №1. 16. Скучик Е. *Основы акустики*. – М.: Мир, 1976. – 520 с. 17. Головинский П.А., Золототрубов Д.Ю., Золототрубов Ю.С., Перцев В.Т. *Исследование распространения ультразвукового импульса в дисперсной фрактальной среде* // *Письма в ЖТФ*. – 1999. – Т. 25. – Вып. 11.