

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Наука – це рух,
посміхнись і працюй!

Студентська наукова робота

**На тему: ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ
НАСІННЯ СОНЯШНИКУ У ВІБРОСУШАРЦІ НА ОСНОВІ
ІНФРАЧЕРВОНОГО ОПРОМІНЕННЯ**

ЗМІСТ

Ст.

1	Анотація.....	
2	Вступ.....	
3	Розділ 1. Аналіз проблематики та літературних джерел.....	
4	Розділ 2 Матеріали і методи дослідження.....	
5	Розділ 3 експериментальні дослідження. Обговорення результатів.....	
6	Висновки.....	
7	Список використаної літератури.....	

Анотація

Одним із перспективних напрямів розвитку харчової промисловості є розширення асортименту і підвищення якості продуктів харчування. При цьому особливу увагу приділяють безпечності і якості сировини. Насіння соняшника – повноцінна сировина для отримання низки харчових і кормових продуктів.

У системі технологічних операцій після збиральної обробки соняшнику найважливіше місце належить сушінню. Якісне сушіння не тільки забезпечує зберігання зібраного урожаю, запобігає його втратам, але у деяких випадках і підвищує якість готового продукту.

У роботі описані технологічні особливості сушіння насіння соняшнику за допомогою інфрачервоного підведення енергії та обґрунтовано перспективність вібраційного моношарного сушіння насіння соняшнику в лотковій вібросушарці. Визначені питомі затрати енергії на процес інфрачервоного сушіння продукту.

Мета роботи: формування принципово нових підходів у переробних технологіях агропромислового виробництва, створення новітніх енергоефективних технологій та обладнання, що реалізують переваги комбінованого підведення енергії на основі вібраційних технологій у процесах сушіння.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі завдання:

1. Аналіз теорії і техніки, результатів впровадження енергоефективних підходів при сушінні олійної рослинної сировини.
2. Проведення комплексних експериментальних досліджень кінетики процесів сушіння при комбінованому енергетичному впливі на оліємістку сировину.
3. Узагальнення результатів експериментального дослідження та створення новітнього обладнання із застосування хвильових (інфрачервоного опромінення та вібраційного транспортування) технологій.

Об'єкт дослідження: технології сушіння рослинних олійних культур

(соняшнику), екологія виробництва та ефективне використання ресурсів.

Предметом дослідження є сушарки вібраційної, інфрачервоної та комбінованої технологічної дії.

Матеріали і методи дослідження. В експериментальних дослідженнях використовували контрольну-вимірювальну апаратуру, сучасні методики та прилади, серед яких і розробки авторів. Для аналітичного дослідження використовувалися програмні пакети: MathCAD, Excel. Методики дослідження зразків проводилися в лабораторіях і відповідали стандартам.

Ключові слова: інфрачервоне сушіння, вібрототкова сушарка, насіння соняшнику, енергія.

ВСТУП

Олійно-жирова галузь посідає провідне місце в агропромисловому комплексі України, що пов'язано з різноманітністю й унікальністю складу олієвмісної сировини різних регіонів світу, масштабністю використання олійно-жирових продуктів для харчових, кормових і технічних цілей, у тому числі стратегічних. Тому стан олійно-жирової галузі визначає розвиток не тільки агропромислового комплексу, а й цілої низки галузей промисловості.

Сушіння є однією з найбільш поширених технологічних операцій в різних галузях переробних і харчових виробництв, зокрема при консервуванні сировини. Перспективи розвитку сушильних технологій передбачають зниження енергетичних витрат на процес вилучення вологи; підвищення якості сушеної продукції; розробку високоефективної універсальної техніки; забезпечення екологічної безпеки сушильних підприємств.

Однією з найважливіших операцій технології обробітку олієвмісного насіння є післяжнивна обробка. Обумовлена нерівномірністю дозрівання, різноякісного насіння олієвмісних культур, що має початкову вологість 15...25%, тоді як кондиційна вологість складає 7...8%. Внаслідок високої вологості і олійності насіння схильне до окислювальних змін і мікробіологічного псування. Тому для збереження високих посівних і технологічних якостей олієвмісного насіння, необхідно проводити своєчасне сушіння.

Через відсутність спеціального технологічного устаткування, сушіння олійних культур відбувається на зерносушильному устаткуванні. Проте існуючі зерносушарки не повністю задовольняють вимоги до якості висушеного насіння. Недосконалість конструкцій існуючих зерносушарок, призводить до великих втрат (до 50%) і зниженню якості насіння.

У зв'язку з цим, дослідження процесу сушіння насіння соняшнику спрямоване на вирішення проблеми збереження якості продукту і підвищення

ефективності процесу сушіння, є актуальним і важливим науково-технічним завданням. При цьому для розробки сучасного високопродуктивного сушарного устаткування для олієвмісного насіння і обґрунтування раціональних режимів сушіння необхідно досліджувати процес, використовуючи традиційні і нові (ефективніші) способи сушіння.

Одним із перспективних способів сушіння олійного насіння є застосування інфрачервоного випромінювання. Техніка зневоднення продуктів і матеріалів значно випереджає теоретичні положення сушіння. Не тільки класична література з проблем сушіння, але і спеціальна не дають конкретних рекомендацій з проєктування установок з електромагнітним підведенням енергії. Разом з тим, саме такі установки активно прогресують і характеризуються серйозними проблемами в моделюванні, тому поки що єдиним надійним шляхом їх дослідження є експеримент.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМАТИКИ ТА ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

Насіння високоолійного соняшнику надійно зберігається, якщо вологість їх не перевищує 7 %, а температура знижена до 10 °С і нижче. При вологості вище критичної та температурі 20...25 °С, в насипі насіння починається бурхливий розвиток мікроорганізмів, інтенсивно відбуваються гідролітичні і окисні процеси. Такі процеси призводять до швидкого погіршення якості насіння соняшнику як олійної сировини. Навіть кілька годин зберігання щойно зібраного насіння високоолійного соняшнику вологістю вище критичної призводить до масового самозігрівання і псування, що робить неможливим отримання високоякісної олії [1].

Сушіння олійного насіння при підготовці їх до технологічної переробки проходить в основному на шахтних і барабанних сушильних установках різних модифікацій.

Останніми роками знаходять застосування сушарки з киплячим шаром, а також (в основному на зернових підприємствах) рециркуляційні сушарки.

Загальними класифікаційними ознаками сушарок для олійного насіння є наступні:

- у сушарках застосовується конвективний спосіб підведення тепла до насіння;
- сушарки стаціонарні, безперервної дії;
- сушильним агентом служить суміш атмосферного повітря (– 90%) з продуктами згорання газоподібного, рідкого і твердого палива (~10%);
- по напрямку руху насіння і сушильного агента сушарки працюють за принципом, близьким до перехресного потоку.

Способи сушіння і конструкції сушарок, вживані за кордоном для сушіння олійного насіння, мало відрізняються від прийнятих в нашій країні. Останніми роками набули також поширення шахтні зерносушарки з попереднім підігріванням зерна і з киплячим шаром. В основному ж

використовується конвективний спосіб сушіння в щільному малорухливому шарі і засновані на ній шахтні, жалюзійні і стрічкові сушарки.

В даний час для сушіння насіння зернових і олійних культур можуть знайти застосування такі сушильні установки.



Рис. 1.1 Сушарка зернова колонкова СЗК-8-1.

Сушарка зернова колонкова СЗК-8-1 (рис. 1.1) [2] призначена для сушіння зерна і насіння зернових колосових, зернобобових, круп'яних, ріпаку, олійних і кукурудзи. Складається з двох колонкових шахт, розділених на камери нагріву, сушки і охолодження зерна, надсушильного бункера, шибєрних випускних пристроїв, завантажувальної і розвантажувальної норій, одного топкового агрегату, системи повітропроводів з пиловими вентиляторами, електроустаткування і засобів автоматичної роботи сушарки. Сушарка має продуктивність до 12 т/год, теплову потужність 700 кВт, встановлену потужність електроприводу 43,2 кВт. Витрата рідкого палива до 80 кг/год.

Питомі витрати:

- палива, кг/т	5,40
- електроенергії, кВт-год/т	3,93
- нерівномірність сушіння, ±%	+ 2,7...- 2,6

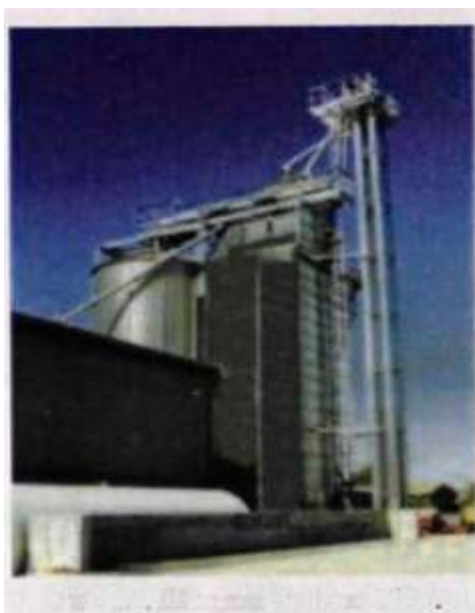


Рис. 1.2. Шахтна сушарка NDT

Шахтна сушарка безперервної дії NDT [3] (рис. 1.2) призначена для сушіння всіх сипких продуктів сільського господарства. Наприклад: пшениця, ріпак, кукурудза, горох, соняшник, рис, боби, ячмінь. Сушарка побудована за принципом повторного використання тепла для процесу сушіння. При цьому ненасичене повітря з охолоджувача сипкого матеріалу повторно підмішується до теплого повітря. Для просування повітря через сушарку передбачені аксіальні і радіальні вентилятори. До приєднаного повітряного каналу може підключатися у разі потреби шумоглушник. Як правило, випуск використаного газу здійснюється через верхню частину сушарки. Вироблення теплого повітря в сушарці може здійснюватися з використанням різних джерел енергії (газ, нафтопродукти, електроенергія). Сушильна установка виготовляється в Німеччині.

Таблиця 1.1

Продуктивність сушарок NDT

Тип	К-ть	Кукурудза 35-15%	Зерно 19-15 %	Ріпак 13-9 %
NDT 3-1	3	2800	8400	6600
NDT 4-1	4	3040	11200	8800
NDT 5-1	5	3800	14000	11000
NDT 6-1	6	4000	16800	13200

Продовження таблиці 1.1

NDT 7-1	7	5320	19800	15400
NDT 8-1	8	6060	22400	17600
NDT 9-1	9	6640	25200	19800
NDT 10-1	10	7600	28000	22000
NDT 11-1	11	8360	30800	24200
NDT 12-1	12	9120	33600	26400
NDT 13-1	13	9880	36400	28800
NDT 14-1	14	10640	39200	30800
NDT 15-1	15	11400	42000	33000
NDT 16-1	16	12160	44800	35200
NDT 8-2	16	12160	44800	35200
NDT 9-2	18	13680	50400	39000
NDT 10-2	20	15200	56000	44000
NDT 11-23	22	16720	61600	46400
NDT 12-2	24	18240	67200	52800
NDT 13-2	26	19760	72800	57200
NDT 14-2	28	21280	78400	61000
NDT 15-2	30	22800	84000	66000
NDT 16-2	32	24320	89000	77400

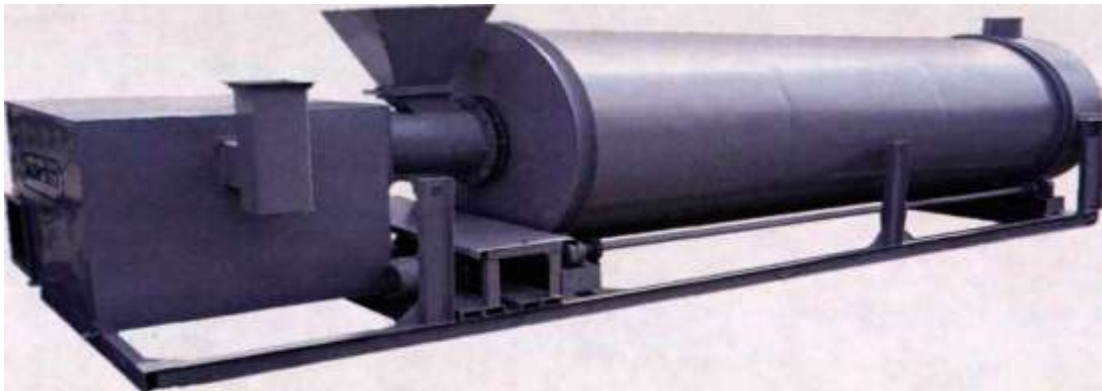


Рис 1.3. Сушарка барабанна СБУ – 1,5

Сушарка барабанна СБУ – 1,5 безперервної дії (рис. 1.3) призначена для сушіння зерна, насіння зернових і олійних культур, а також інших органічних і неорганічних сипких матеріалів

Технічні характеристики сушарок барабанного типу СБУ

Модель	СБУ-1,5-4	СБУ-1,5-5	СБУ-2,0-7
Тип	Прямоточна з одним Теплогенератором	прямоточна з одним теплогенератором	протиточна з двома теплогенераторами
Продуктивність, т/час	0,3	0,5	1,0
Потужність, кВт	3	3	3
Діаметр барабану, м	1,5	1,5	2
Довжина барабану, м	4	5	7
Габаритні розміри, мм	2000x6000x2000	2000x7000x2000	4000x10000x2000

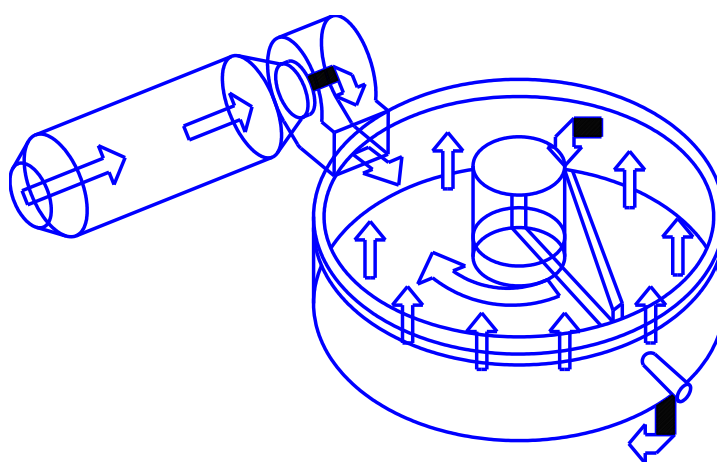


Рис. 1.4. Сушарка карусельна універсальна

Сушарки призначені для сушіння зернових, соняшнику, ріпаку, рису, бобових культур і насіння трав. Сушарки працюють потоково, безперервно. Півметровий шар насіння продувається знизу потужним потоком теплого повітря. Насіння в нижній частині шару, у міру сушіння, відділяються і виводяться з сушарок, а зверху автоматично доповнюються вологим насінням. Продуктивність таких сушильних установок на продовольчому режимі складає 2,5... 15 т/год. [2]

Витрата рідкого палива на 1т висушеного продукту до 6 кг, газу - до 8м³. Встановлена потужність електродвигунів від 20 до 63 кВт.

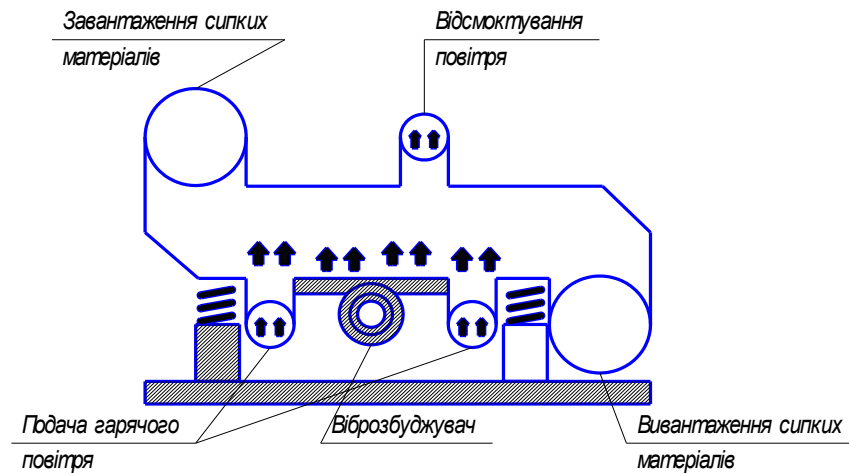


Рис 1.5. Схема сушарки вібраційної конвективної СВІК – 1

Сушарка призначена для сушіння (охолодження) сипких, зернистих і порошкоподібних матеріалів, не схильних до прилипання, з розміром часток від 0,05 до 5,00 мм.

Сушарка рекомендується до застосування в хімічній, мікробіологічній промисловості, для процесів виробництва харчових продуктів і переробки сільгосппродукції.

Вібраційна конвективна сушарка є тепломасообмінним апаратом безперервної дії і є зарезонансною системою, що коливається. [2]

Сушарка вібраційна з інфрачервоними випромінювачами СВІК (рис. 1.5) застосовується для сушіння зернових і порошкоподібних продуктів у віброкиплячому шарі з енергопідведенням в електромагнітному полі інфрачервоного діапазону. Технічна характеристика сушильних установок СВІК- 50, СВІК-100 і СВІК-350 приведена в таблиці 1.3

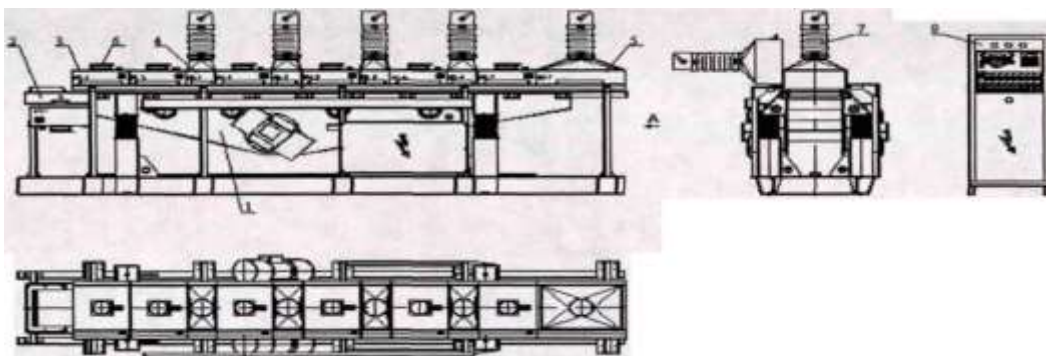


Рис. 1.6. Сушарка вібраційна з інфрачервоними випромінювачами СВІК

Таблиця 1.3

Технічна характеристика сушильних установок типу СВІК

Найменування		Значення		
		СВІК-50	СВІК-100	СВІК-350
Продуктивність кг/год	по вихідному продукту	50	100	350
	по випаруваній волозі	6... 8	10...12	30...35
Кількість касет інфрачервоних випромінювачів		4	5	7
Параметри касети	кількість ламп	4	4	7
	потужність, кВт	4	4	7
Встановлена потужність, кВт	інфрачервоних випромінювачів	16	20	49
	приводів конвеєра	0,37x2	0,37x2	0,75x2
	Вентиляторів	0,37	0,68	0,99
Температура нагріву матеріалів, не більш, °С		250	250	250
Частота коливань лотка конвеєра, Гц (кільк/хв)		15(900)...25(1500)		
Габаритні розміри лотка, мм	Довжина	2530	3170	4100
	Ширина	200	200	350
	Висота	55	55	55
Габаритні розміри сушарки, мм	Довжина	2768	3440	4368
	Ширина	764	764	980
	Висота	1170	1170	1340
Маса, кг		490	600	900

Сушарка вібраційна з інфрачервоними випромінювачами СВІК є горизонтальним вібраційним конвеєром 1 з робочим органом у вигляді прямокутного лотка 2 з корозійною стійкої сталі. Зверху над лотком стаціонарно розташовані касети 3 інфрачервоних випромінювачів, секції відведення пари" 4 і секція охолодження продукту 5. Початкова ділянка лотка прогривається касетою встановленої знизу.

Кожна касета ІЧ-випромінювачів (кварцеві галогенні лампи КГТ з колірною температурою напруження 2500К) забезпечена вбудованим вентилятором 6 з секторною заслінкою, який забезпечує охолодження контактів ламп і подачу нагрітого повітря в зону сушіння. Касети і секції шарнірно встановлені на круглій штанзі для піднімання і повороту їх при технічному обслуговуванні ламп і лотка.

Секції відведення пари і секція охолодження матеріалу сполучені гнучкими повітропроводами 7 відповідно з витяжним і припливним вентиляторами. Матеріал, що поступає в сушарку, під дією вібрації безперервно переміщається по лотку, послідовно проходячи під касетами ІЧ-випромінювачів і секціями відведення пари. Мікрохвильове інфрачервоне випромінювання, що генерується кварцовими галогенними лампами, проходить крізь шар, перетворюється в теплову енергію, нагріває матеріал і випаровує з нього вологу. Повітря, що подається вентилятором, вбудованим в касету, проходить усередині неї по каналах, охолоджує контакти ламп, нагрівається при цьому і поступає в зону сушіння, забезпечуючи конвективний тепломасообмін і видалення пари випарованої вологи. Відведення насиченого вологою повітря здійснюється витяжним вентилятором через секції відведення пари, сполученої гнучкими повітропроводами з колектором. Висушений матеріал перед вивантаженням з сушарки охолоджується повітрям, припливним вентилятором, що подається, в секцію охолодження.

Швидкість транспортування матеріалу і час його обробки регулюється зміною швидкості обертання вібраторів. Температура лотка під касетами контролюється контактними термopарами, температура матеріалу на виході з сушарки контролюється безконтактним датчиком (пірометром).

Для сушіння невеликих партій зерна і насіння, особливо на майданчиках тимчасового зберігання, застосовуються пересувні зерносушарки, змонтовані на автомобільних причепах. Вони випускаються: шахтні, барабанні, колонкові та інших типів. [2] Модернізована шахтна зерносушарка марки К4-УС2-А, змонтована на автопричіпі МАЗ-8925. Її пристрій показаний на рисунку 1.7.

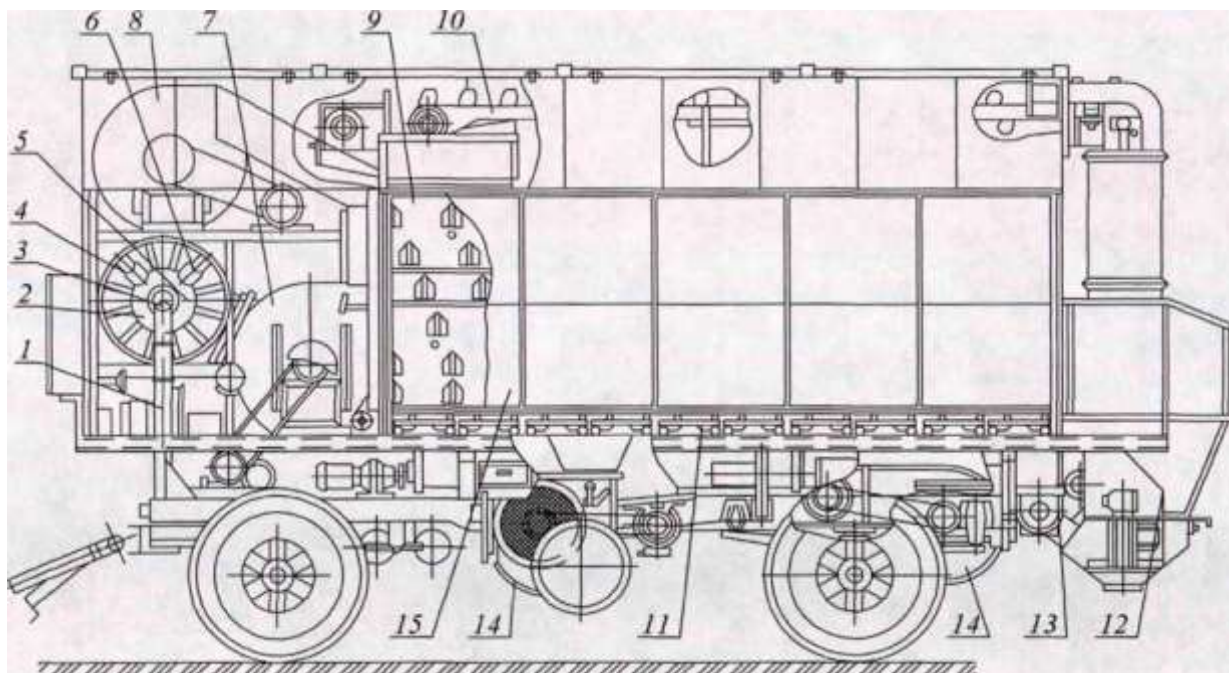


Рис. 1.7. Зерносушарка К4-УС2-А: 1 – вентилятор ВВД № 5; 2 – топка; 3 – форсунка; 4 – електророзпалювач; 5 – паливопровід; 6 – привід контролю полум'я; 7 – вентилятор другої сушильної зони; 8 – вентилятор першої сушильної зони; 9 – шахта сушильна і охолоджувальна; 10 – ковшовий конвеєр; 11 – випускний механізм; 12 – бункер; 13 – шнеки; 14 – вентилятори охолоджувальної шахти; 15 – кожух сушарки

Вона складається з двох сушильних шахт, топки, вентиляторів, транспортного устаткування і апаратури управління. У кожній шахті встановлено шість рядів клинових коробів і підлозі коробів. У нижній частині шахт є розсікачі потоку зерна. При сушінні дрібнонасінневих культур (просо, ріпак, гірчиця, чечевиця) конічні насадки розсікачів опускаються, що перешкоджає видуванню зерна із зерносушарки. Між шахтами розташовано три напірно-розподільні камери для агента сушіння (дві) і повітря (одна), що охолоджує, утворені горизонтальними перегородками. Для подачі агента сушіння з топки служить вентилятор Ц9-57 № 6, холодного повітря - Ц9-5.

Схема руху зерна у сушарці показана на рисунку 1.8.

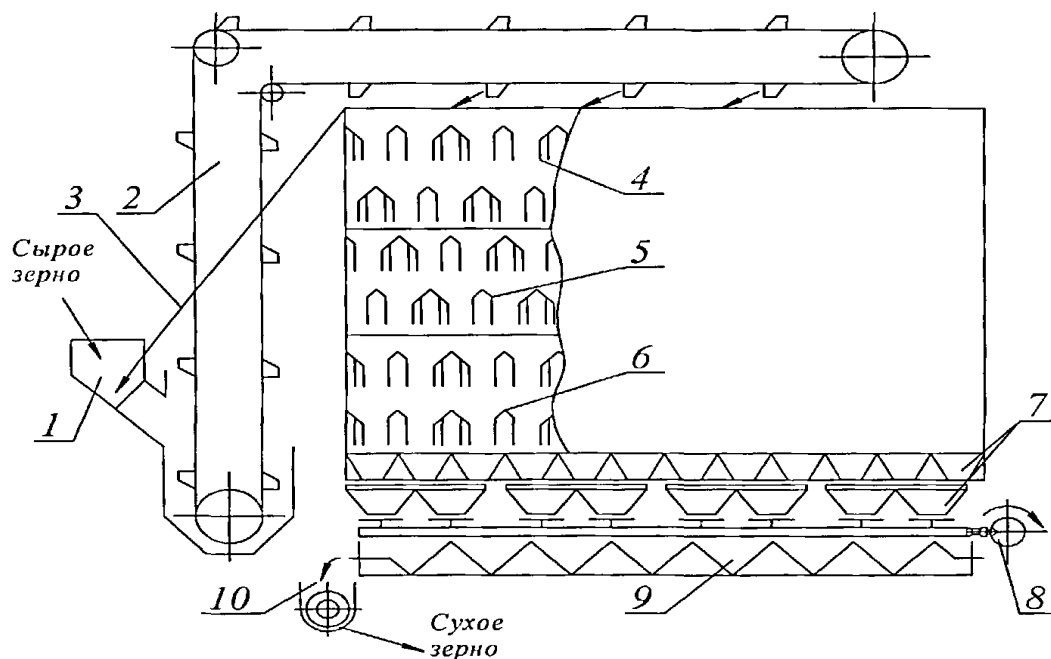


Рис. 1.8. Схема руху зерна в зерносушарці К4-УС2-А: 1 – приймальний бункер; 2 – Г-подібний конвеєр; 3 – зливний самоплив; 4, 5 – сушильна шахта з коробами; 6 – охолоджувальна шахта; 7 – розсікачі і випускний механізм; 8 – привід випускного механізму; 9, 10 – шнеки для сухого зерна

Наявність двох завантажувальних Г-подібних ковшових конвеєрів (норій) і трьох розвантажувальних шнеків (два подовжніх і один поперечний) дозволяє пропускати зерно через дві шахти паралельно або послідовно через кожну шахту. При другому варіанті значно збільшується знімання вологи за один пропуск через агрегат. У сушарці використаний випускний механізм безперервної дії. Зерносушарка працює на рідкому паливі.

Таблиця 1.4

Технічна характеристика зерносушарки К4-УС2-А

Продуктивність, пл.т/ч	10
Витрата агента сушіння, м ³ /ч	34000
Витрата охолоджувального повітря, м ³ /год	11000
Маса зерна в сушарці при ($\rho = 750 \text{ кг/м}^3$), т	10,0
Окремі витрати умовного палива, кг/т	12,2
Окремі витрати дизельного палива, кг/т	8,5

Продовження таблиці 1.4

Вживана потужність, кВт	40
Габаритні розміри (ДхШхВ), мм	9300 x 2750 x 4000
Маса, кг	10800

Пересувна барабанна зерносушарка СЗПБ – 2,5 це поєднанням двох барабанів – сушильного і охолоджувального (рис. 1.9). Сушильний барабан діаметром 1000 мм і завдовжки 5000 мм спирається на чотири пари роликів, з яких дві пари покрито гумою і служать для приводу барабана. Усередині він розділений на шість секцій з лопатями і полицями, призначеними для кращого перемішування і розподілу зерна по поперечному перетину барабана.

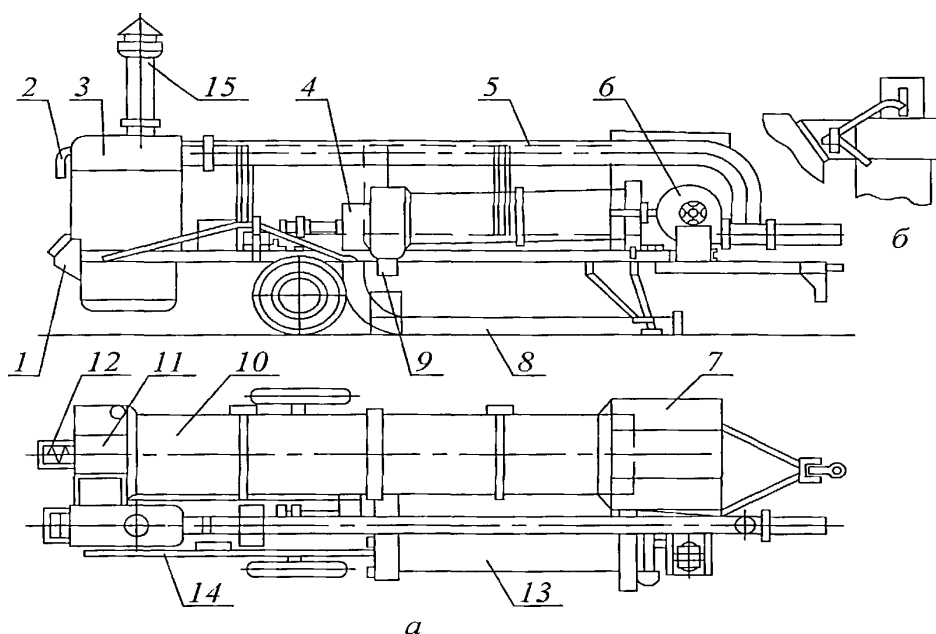


Рис. 1.9. Пересувна барабанна сушарка СЗПБ– 2,5: а – схема сушарки; б – блокування дросель - клапанів. 1 – топка; 2 – патрубок регульованої подачі повітря; 3 – коробка змішувача; 4 – вентилятор охолодження; 5 – трубопровід; 6 – вентилятор сушильного барабана; 7 – задня камера; 8 – повітропроводи; 9 – шлюзовий затвор; 10– сушильний барабан; 11 – передня камера; 12 – бункер з шнеком; 13 – охолоджувальний барабан; 14 – рама з колісним ходом; 15 – димар.

На торцевих сторонах барабана знаходяться камери: у одну з них надходить сушильний агент, а інша служить для відведення відпрацьованого

агента. У їх стінках зроблені лабіринти ущільнення для запобігання видуванню газів назовні при обертанні барабана.

Охолоджувальний барабан діаметром 550 мм і завдовжки 2300 мм обертається з частотою 27 об/хв. На його поверхні з боку надходження зерна з сушильного барабана розташовано вісім ковшів, з яких воно зсипається всередину охолоджувального барабана, що має по колу зігнуті лопаті для підйому зерна.

Вологе зерно подають в сушильний барабан з приймального пристрою або з насипу шнеком через самотоки на шість гвинтоподібних доріжок, що підводять зерно до секцій барабана. Просуваючись уздовж нього, зерно в кінці потрапляє на гвинтоподібні доріжки, які служать для відведення його через шнек в охолоджувальний барабан. Охолоджене зерно зсипається через шлюзовий затвор на похилий пересувний шнек.

Таблиця 1.5

Технічна характеристика зерносушарки СЗПБ – 2,5

Продуктивність по вологому зерну при сушінні пшениці (при зниженні вологи з 20 до 14 %), т/год	2,5
Окремі витрати умовного палива, кг/год	12,0
Встановлена потужність електродвигунів, кВт	10
Кількість електродвигунів	5
Окремі витрати електроенергії, кВт-год/пл. т	3,24
Маса, кг	4000

Серед недоліків розглянутих вище сушильних установок можна виділити наступні:

- неможливість значно інтенсифікувати процес сушіння з метою збільшення продуктивності і підвищення коефіцієнта використання тепла;
- неможливість забезпечення необхідної якості продукту за рахунок принципів лише конвективного теплообміну.
- висока витрата електроенергії на привід допоміжного обладнання;
- невисока продуктивність при порівняно великих питомих енерговитратах

- обмежене вживання при сушінні мілконасінневої сировини;
- необхідність роботи на рідкому паливі або газі;
- низька екологічність;
- велика питома металоємність, складність у виготовленні і ремонті;
- висока температура відпрацьованого сушильного агента (120..140°C);
- великі габаритні розміри.

Експериментально встановлено [4, 5], що інфрачервоні промені проникають в глибину матеріалу, причому глибина проникнення зменшується зі збільшенням довжини хвилі (при зниженні температури випромінювача). Для вологих матеріалів проникність інфрачервоних променів мала. Проходження променів на певну глибину всередину тіла призводить до аномального розподілу температури всередині нього. При нагріванні або сушінні капілярно-пористих тіл, такими і є олійне насіння, температура максимальна не на поверхні, а на деякій глибині [6]. Починаючи від поверхні, температура спочатку підвищується, досягає максимального значення на невеликій глибині, а потім знижується.

Обґрунтування різних причин, що викликають аномальний розподіл температури по товщині матеріалу при ІЧ- опроміненні, викладено в роботах А.В Ликова [4], С.Г. Ільєсова [6] , А.С. Гінзбурга [7], І.А. Рогова [8], та ін. Це явище пояснюється комплексом причин: поглинання ІЧ-випромінювання, що проникає в матеріал на певну глибину з переходом в теплоту; втратою енергії (випромінюванням, конвекцією, теплопровідністю) відкритою поверхнею в навколишнє середовище; явищем теплового ковзання – циркуляцією повітря в порах під дією температурного градієнта; явищем молекулярної течії – дифузії газу в мікрокапілярах у напрямку температурного градієнта; витратами тепла на пароутворення при випаровуванні вологи в поверхневому шарі.

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 згодовування, надзвичайно важливі – їх вирішення ускладнюється відсутністю уніфікованих підходів до синтезу математичної моделі тепломасообмінних процесів і мінливістю взаємопов'язаних кінетичних коефіцієнтів у розроблених аналітичних моделях, що залежать від фізичних і хімічних властивостей взаємодіючих речовин і енергій [9].

Енергоефективність інфрачервоних сушарок безпосередньо пов'язана з характеристиками поглинання матеріалу, що визначає економічну доцільність сушарки [10]. ІЧ-випромінювання проникає безпосередньо у внутрішній шар матеріалу без нагрівання навколишнього повітря. Відстань між джерелом нагріву і матеріалом, швидкість повітряного потоку і температуру, а також швидкість матеріалу (якщо безперервна ІЧ-сушарка) може істотно впливати на енергетичну ефективність.

Якщо підсумувати та проаналізувати експерименти інших дослідників, можна зробити висновок, що збільшення рівня потужності інфрачервоного випромінювання призводить до скорочення часу сушіння, тоді як збільшення швидкості повітря призводить до збільшення часу сушіння та споживання енергії. Підвищуючи швидкість повітря, поверхневий шар стає прохолодним і необхідний більш тривалий час сушіння. Таким чином, швидкість повітря повинна регулюватися для забезпечення кращих результатів. Рівень потужності інфрачервоного випромінювання також потрібно регулювати, оскільки збільшення потужності може призвести до втрати якості. Крім того, існують інші фактори, які не були розглянуті дослідниками – такі як вплив вібрації на процес сушіння в ІЧ сушарках.

Дослідниками інституту холоду та біотехнологій Санкт-Петербургу [11] проведено дослідження процесу сушіння насіння соняшнику насінневого фонду інфрачервоним випромінюванням виділеної довжини хвилі при досягненні заданого вмісту вологи і температури, що не перевищує 44 – 46 °С на поверхні шару оброблюваного матеріалу залежно від висоти шару продукту, густини теплового потоку, відстані від інфрачервоного випромінювача до продукту. З аналізу експериментальних кривих видно, що

вологість насіння соняшнику протягом усього процесу сушіння зменшується з плином часу за лінійним законом, при цьому температура в центрі шару продукту не перевищує $44 - 46 \text{ }^\circ \text{C}$. Проте, дослідники [11] не застосовували вібраційний вплив переміщення зерна вздовж сушарки.

У роботі [12] 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 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.

Авторами в роботі [13] запропоновано технології адресної доставки енергії для інтенсифікації тепломасопереносу при переробці харчової сировини. В основі запропонованих гіпотез – хвильові технології комбінованої електромагнітної і вібраційної дії. Обґрунтовано механізми, ефекти і математичні моделі бародифузії і дії вібраційних полів. Запропоновано числа хвильової подібності, на основі яких узагальнені бази експериментальних даних сушіння.

Були проведені численні дослідження тонкошарового сушіння харчових продуктів, використовуючи різні способи обробки і способи сушіння: соя [14], подрібнений рис [15], гібридне рисове насіння [16], але дуже мало інформації для вібраційного інфрачервоного сушіння насіння соняшнику.

Нами проводились дослідження на розробленій вібротерморадіаційній моношарній сушарці «осцилюючого» нагрівання. Тому при подальших дослідженнях, для зменшення температури прогрівання частинок продукції при не меншій величині зменшення її вологості було запропоновано [17,18]

використовувати «осцилююче» нагрівання інфрачервоним промінням, при якому періоди нагрівання чергуються із періодами обдування холодним повітрям, а для збудження коливань використано електромеханічний дебалансний вібропривід.

РОЗДІЛ 2 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

В експериментальних дослідженнях використовували контрольнo-вимірювальну апаратуру, сучасні методики та прилади, серед яких і розробки авторів. Для аналітичного дослідження використовувалися програмні пакети: MathCAD, Excel. Методики дослідження зразків проводилися в лабораторіях і відповідали стандартам.

Дослідно-промисловий зразок вібраційної машини для сушіння насіння соняшнику, спроектований і виготовлений у лабораторії автоматизації технологічних процесів Вінницького національного аграрного університету, дозволяє у широких межах регулювати температуру сушіння (від 20 до 180°C), швидкість повітря змінюється в межах 0,5...2,5 м/с, амплітуда коливань вібротка (від 0,5 до 6 мм). Принципова схема такої сушильної машини наведена на рис. 2.1.

Технічна характеристика лабораторної вібраційної сушарки

Продуктивність, кг/год.	110;
Потужність електронагрівачів, кВт	6,0;
Потужність віброприводу лотків, кВт	1,0;
Потужність вентилятора, кВт	0,5
Амплітуда коливань вібротка, мм	0-6;
Частота обертів приводного електродвигуна, об/хв.	910;
Температура у термокамері, °С	20-180;
Маса, кг	230;
Габаритні розміри, мм	1400x600x3000;

Машина складається із закритого кожухом корпусу 1, на площадках 2 якого за допомогою пружних елементів 3 встановлено термічний 4 і колосниковий 5 лотки. Робоча доріжка термічного лотка 4 виготовлена із жаростійкої листової сталі. Робоча доріжка колосникового лотка утворюється повздовжніми вертикальними смужками 7, що приварені до кронштейнів 8

таким чином, щоб між ними був повздовжній зазор $\delta = 1,5...2$ мм. По середині кожного лотка змонтовано віброприводи, що містять по два відцентрових віброзбуджувачі, встановлені із боків лотка.

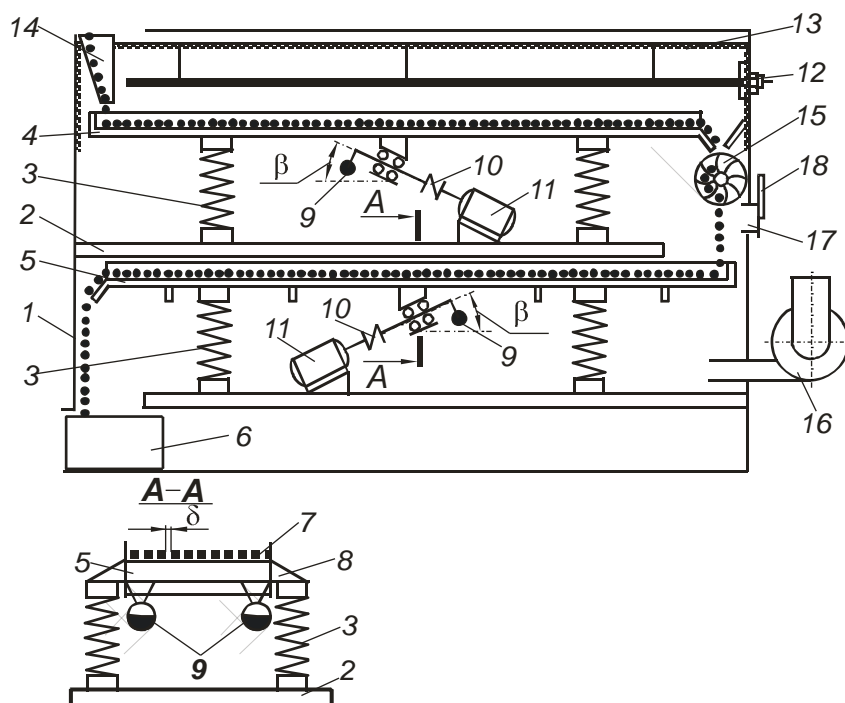


Рис. 2.1. Схема лабораторної інфрачервоної моношарної віброосушарки:

1 – корпус; 2 – площадка; 3 – пружні елементи; 4 – термічний лоток; 5 – колосниковий лоток; 6 – приймальний бункер; 7 – повздовжні вертикальні смужки; 8 – кронштейн; 9 – дебалансний вантаж; 10 – еластична муфта; 11 – електродвигун; 12 – термогенератори; 13 – термоізоляція; 14 – завантажувальна горловина; 15 – крильчатка; 16 – вентилятор; 17 – вивідні патрубки; 18 – регулювальний шибер.

Кожний відцентровий віброзбуджувач містить вал із дебалансними вантажами 9, який за допомогою еластичної муфти 10 з'єднаний з приводним асинхронним електродвигуном 11. Причому у кожному віброприводі електродвигуни 11 з'єднані таким чином, щоб при підключенні до мережі їх ротори обертались назустріч один одному. Вали з дебалансними вантажами 9 встановлені на підшипниках паралельно один до одного під кутом β до площин робочих доріжок лотків. Над поверхнями термічних лотків 4

закріплені термогенератори 12 (ІЧ-випромінювачі). Зверху і з боків термічний лоток 4 закритий термоізоляцією 13. Над початком термічного лотка 4 закріплена завантажувальна горловина 14, а в кінці крильчатка 15, під початком колосникового лотка 5 розміщено нагнітальний патрубок вентилятора 16, а вище поверхні колосникового лотка 6 – вивідний патрубок 17 з регулювальним шибером 18. У кінці колосникового лотка 5 встановлено приймальний бункер 19.

Машина працює таким чином: при ввімкненні приводних електродвигунів 11, їх ротори починають обертатись назустріч один одному у кожному віброприводі, що призводить до динамічної синхронізації їх обертання, внаслідок чого генеруються поступальні коливання лотків 4 і 5 під кутом β до площин їхніх робочих доріжок. Сипуча продукція подається через завантажувальну горловину на поверхню лотків, де під дією коливань розподіляється моношаром. Під дією коливань лотків між їх поверхнею і частинками сипкої продукції виникає асиметрія сил тертя, що призводить до виникнення спрямованого руху частинок сипкої продукції (вібротранспортування) вздовж поверхні лотків. При цьому точки поверхні лотків коливаються відносно деякого центру без направлено руху загалом за період одного коливання. За допомогою зміни статичних моментів дебалансних вантажів 9 відносно осі обертання встановлюється режим вібротранспортування із неперервним підкиданням частинок сипучої продукції під час їх переміщення вздовж лотків. Неперервне підкидання частинок продукції призводить до їх хаотичного повертання при переміщенні вздовж термічних лотків 4, над якими знаходяться термогенератори 12 і сприяє їх рівномірному опроміненню з усіх боків інфрачервоним промінням, що призводить до інтенсивного, швидкого і рівномірного прогрівання насіння соняшнику.

Після проходження термічного лотка, прогріта продукція (насіння соняшнику) подається через барабанну крильчатку 15 на колосниковий лоток 5, де обдувається атмосферним повітрям від вентилятора 16. При цьому,

неперервне хаотичне підкидання і повертання частинок продукції, також покращує рівномірність їх обдування повітрям, що призводить до порушення рівноважного стану вологи у частинках продукції, коли тиск парів води в них стає більшим за парціальний тиск парів води у повітрі, внаслідок чого волога починає інтенсивно випаровуватись [17, 18].

Оброблена продукція після проходження колосникового лотка 5 подається у приймальний бункер 19. Барабанна крильчатка 15 запобігає доступу потоку холодного повітря від вентилятора 16 у камеру високої температури над термічним лотком 4 і водночас дозволяє просипання продукції з термічного лотка 4 на колосниковий 5.

Інтенсивність повітряних потоків регулюється шибром 18. Швидкість вібротранспортування сипкої продукції, а отже час її знаходження на поверхні лотків регулюється шляхом зміни статичних моментів дебалансних вантажів 9 відносно осі їх обертання або кута β . Оскільки інфрачервоне випромінювання термогенератора 12 дозволяє створити дуже інтенсивний тепловий потік, що сприяє швидкому прогріванню частинок продукції, а процес випаровування із них вологи вимагає більшого проміжку часу, то швидкість вібротранспортування на колосниковому лотку 5 встановлюється більшою.

Інфрачервоний нагрівальний пристрій складався з 24 інфрачервоних ламп на 250 Вт (OSRAM, Словаччина), що розташовані у сушарці в шаховому порядку. Відстань між лампами, при якій досягається найбільша рівномірність енергетичної випромінюваності поверхні висушуваного матеріалу була 0,12 м. Лампи працюють від джерела живлення 220 В. ІЧ лампи можна розташовувати на відстані 5...15 см від поверхні лотка.

Вологість насіння соняшнику визначається висушуванням проб до постійної маси. Проби відбирались до і після проходження ІЧ- опромінення та обдування повітрям.



Рис.2.2. Фото експериментальної вібрототкової інфрачервоної сушарки (крильчатка, вивідні патрубки, регулювальний шибер на фото не показані)

Бункер завантаження продукції забезпечений шлюзом, який регулює товщину моношару продукту на лотку в межах 7...22 мм залежно від розмірів зерна та швидкості його руху в лотку.

Інтенсивність інфрачервоного випромінювання змінювалася шляхом зміни відстані між лампами і поверхнею прийому. Також для досягнення необхідного рівномірного однакової інтенсивності інфрачервоного випромінювання, згадану відстань регулювали вручну, змінюючи висоту підвісу корпусу лампи. Для забезпечення однорідності інфрачервоного випромінювання над соняшником попередні вимірювання проводили перед основними випробуваннями.

Маса зерна визначалась електронними вагами ТВЕ-0,21-0,01. Температура продукту вимірювались дистанційно пірометром Laserliner. Зміна маси зерен до проведення дослідження і після, визначала масу вилученої вологи.

У дослідах фіксувалась тривалість процесу, температура і маса соняшника на початку та в кінці обробки. Питома маса матеріалу (g) показує

масу (m) продукту на одиницю поверхні обробки (F), а питома потужність - ІЧ- енергію, яка витрачається на 1 м^2 оброблюваної поверхні.

Таблиця 2.1

Діапазон дослідження процесу ІЧ - сушіння

Сировина	Питома потужність ІЧ, кВт/м ²	Середня температура насіння, T , °С	Завантаження, g , кг/м ²	Тривалість процесу τ , хв
Насіння соняшнику	3,0...6,0	34...44	4,11...8,22	30...60

Досліди проводилися при температурі повітря у приміщенні 20°C за відносної вологості повітря у приміщенні 65% . Вивчався вплив потужності підведеної енергії на середню швидкість процесу сушіння. Проводились дослідження при швидкості руху зерна в лотку $0,025 \text{ м/с}$, і питомому завантаженні $4,11 \text{ кг/м}^2$. Кількість питомої вологи визначали за початковою і кінцевою вологістю соняшника. Швидкість сушіння розраховувалась за кількістю питомої вологи і часу, протягом якого на насіння соняшнику впливало ІЧ-випромінювання.

Під час сушіння температура поверхні насіння контролювалася і була меншою за 60°C . Масова витрата вхідного повітря забезпечувалась вентилятором і контролювалася за допомогою електричного інвертора (N50-007SF, Корея). Швидкість повітря для всіх дослідів вимірювали за допомогою TESTO Анемометр 425 (Німеччина) з точністю $\pm 0,03 \text{ м/с}$. Швидкість повітря змінюється в межах $0,5...2,5 \text{ м/с}$ шляхом регулювання обертів двигуна вентилятора.

Початкова вологість насіння соняшника була рівна $17 \pm 0,5\%$. Всього було проведено 34 експерименти з комбінацій трьох рівнів інфрачервоного випромінювання ($3000, 4000, 6000 \text{ Вт/м}^2$) і вібрації (24 ГЦ). Щоб виміряти зміну вологості в процесі сушіння, вібрлоткову сушарку через проміжок часу в 7 хв зупиняли і відбирали проби.

РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ.

Зниження витрат на сушіння насіння соняшнику як енергоємного процесу, поряд з підвищенням інтенсивності вологовіддачі розглядається як найважливіше завдання при розробці нових технологій сушіння і конструкцій сушарок. Будь-яка модернізація сушарки може бути визнана досить ефективною, якщо досягнуте скорочення питомих енерговитрат (при обов'язковому збереженні якості продукту).

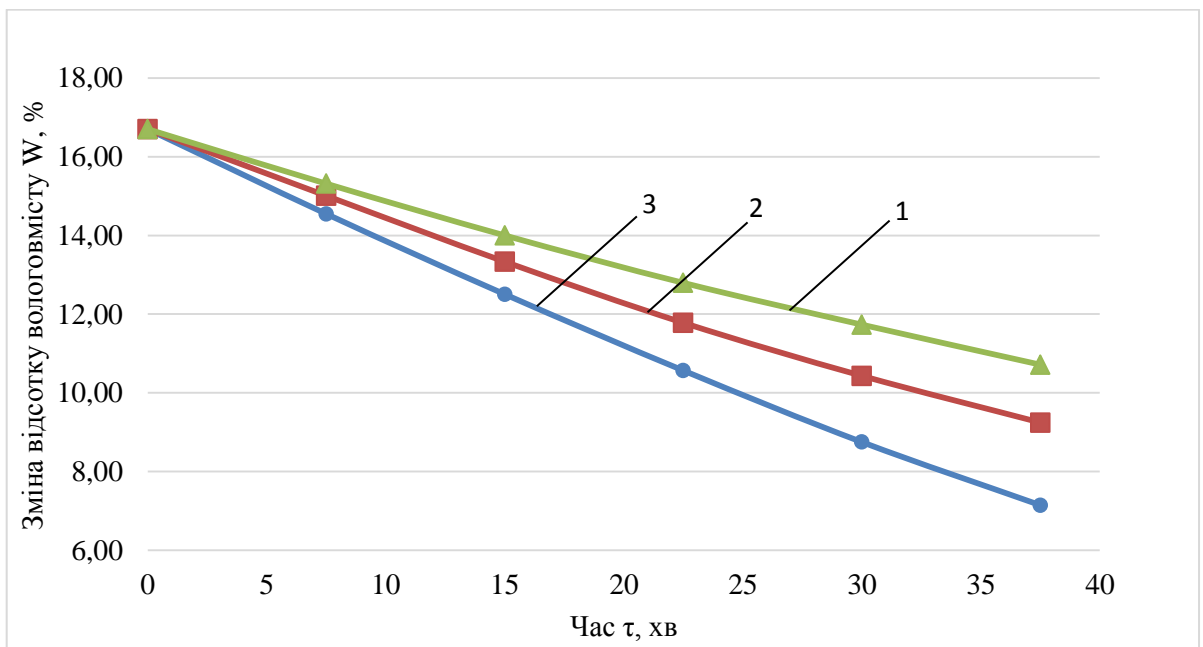


Рис. 3.1 Вплив питомої потужності на кінетику сушіння:
де, 1 – $N = 3000 \text{ Вт/м}^2$; 2 – $N = 4000 \text{ Вт/м}^2$; 3 – $N = 6000 \text{ Вт/м}^2$.

Параметрами ІЧ-сушіння насіння соняшнику, що рекомендуються, лампами "OSRAM" на підставі проведених експериментальних досліджень слід вважати: висоту підвішування ІЧ-випромінювача при сушінні зерна $h = 0,1 \text{ м}$; $t_{\min} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ до $t_{\max} = 43 \text{ }^\circ\text{C}$. При збільшенні питомої потужності у 2 рази (рис.3.1) час процесу сушіння зменшується пропорційно. Час процесу

сушіння до відносної вологості продукту у 6-7% займає 35...60 хвилин. Із даних (рис.3.1) визначались значення швидкості сушіння (рис.3.2).

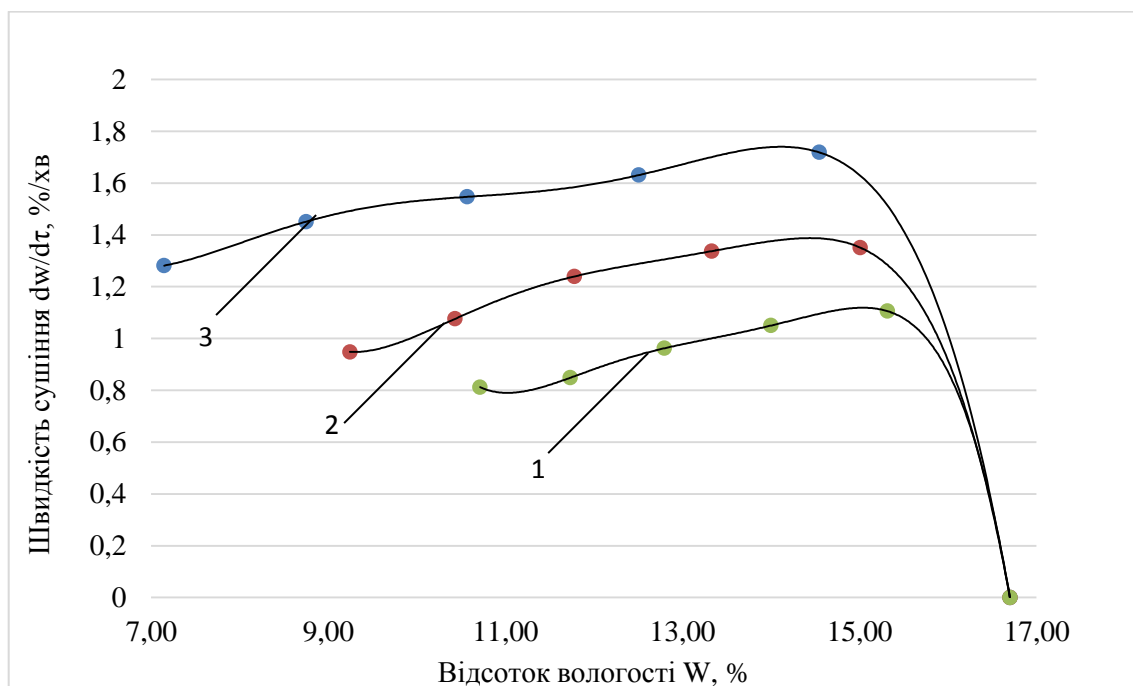


Рис. 3.2 Вплив питомої потужності на швидкість сушіння де, 1 – $N = 3000 \text{ Вт/м}^2$; 2 – $N = 4000 \text{ Вт/м}^2$; 3 – $N = 6000 \text{ Вт/м}^2$.

Видно (рис. 3.2), що при збільшенні кількості підведеної енергії у 2 рази, швидкість сушіння зростає на 50%. Швидкість сушіння змінюється в межах 1...2,15 %/хв. Продуктивність установки в режимі завантаження $4,11 \text{ кг/м}^2$ при швидкості $0,025 \text{ м/с}$ склала 8 кг/год сухого зерна вологістю 6,5%. При цьому, при підвищенні потужності у 2 рази збільшення температури насіння соняшника на виході не перевищує $43 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 3.3), що є досить важливим у процесі сушіння насіння.

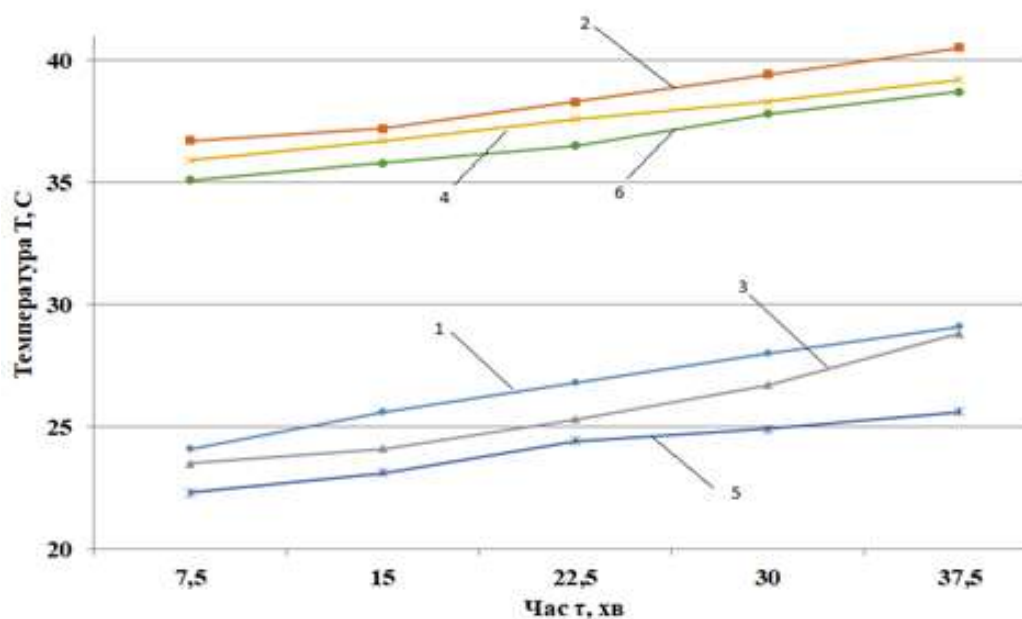


Рис. 3.3 – Вплив питомої потужності на температуру продукту.

- де, 1 – температура продукту на вході до сушарки при $N = 6000 \text{ Вт/м}^2$;
 2 – температура продукту на виході із сушарки при $N = 6000 \text{ Вт/м}^2$;
 3 – температура продукту на вході до сушарки при $N = 4000 \text{ Вт/м}^2$;
 4 – температура продукту на виході із сушарки при $N = 4000 \text{ Вт/м}^2$;
 5 – температура продукту на вході до сушарки при $N = 3000 \text{ Вт/м}^2$;
 6 – температура продукту на виході із сушарки при $N = 3000 \text{ Вт/м}^2$;

На підставі проведених досліджень запропонована принципова схема вібролоткової моношарної сушарки переміжного інфрачервоного нагрівання [19, 20]. Випробування ІЧ вібросушарки проводилось на базі комплексу обладнання, у якому для кінцевого сушіння насіння соняшнику використовувалась шахтна сушарка БРИГ ЗШ-400 продуктивністю 400 кг/год при встановленій потужності електронагрівачів та приводу вентилятора 35 кВт, потужність нагрівачів, віброприводу та вентилятора ІЧ вібросушарки, становила 7,5 кВт при продуктивності роботи 110 кг/год. При порівнянні витрат економія електроенергії на сушіння в розробленій ІЧ сушарці складає 1,2 рази. Економія електроенергії здійснюється за рахунок того, що у ІЧ вібросушарці не нагрівається повітря, як це здійснюється у

конвективних сушарках, а нагрівається безпосередньо саме насіння, тому втрати тепла з відпрацьованим теплим повітрям відсутні, а вони є найбільшими при роботі конвективних зерносушарок. Сушильна установка зберігає усі переваги лабораторної інфрачервоної моношарної вібросушарки, що описана вище. При цьому максимальна температура прогрівання частинок продукції у 1,5 – 2 рази менша при більших межах зменшення їх вологості. Це дозволяє здійснювати якісний обробіток продукції при менших теплових витратах.

На основі проведених досліджень запропонована принципова схема вібрлоткової моношарної сушарки приведена на рис. 3.4 [19, 20, 21]. Машина складається із закритого кожухом корпусу 1, на площадках 2 якого за допомогою пружних елементів 3 встановлено два (або більше) термічних 4 і два (або більше) колосникових 5 лотки. Лотки встановлені один під одним, таким чином, щоб термічні лотки 4 чергувались із колосниковими лотками 5, причому верхнім (першим) лотком є термічний, а нижнім – колосниковий. Робочі доріжки термічних лотків 4 виготовляються із жаростійкої листової сталі. Робочі доріжки колосникових лотків утворюються повздовжніми вертикальними смужками 7, що приварені до кронштейнів 8, таким чином, щоб між ними був повздовжній зазор $d = 1,5 \dots 2$ мм. По середині кожного лотка змонтовано віброприводи, що містять по два відцентрових віброзбуджувачі, встановлені із боків лотка. Кожний відцентровий віброзбуджувач містить вал із дебалансними вантажами 9, який за допомогою еластичної муфти 10 з'єднаний з привідним асинхронним електродвигуном 11. Причому у кожному віброприводі електродвигуни 11 з'єднані таким чином, щоб при підключенні до мережі їх ротори обертались назустріч один одному. Вали з дебалансними вантажами 9 встановлені на підшипниках паралельно один до одного під кутом β до площин робочих доріжок лотків. Над поверхнями термічних лотків 4 закріплені термогенератори 12. Зверху і з боків термічні лотки 4 закриті термоізоляцією 13. Над початками термічних лотків 4 закріплені завантажувальні горловини

14, а в кінці барабанні крильчатки 15. Нижче поверхонь колосникових лотків 5 розміщені нагнітальні патрубки вентиляторів 16, а вище поверхні колосникових лотків 6 – вивідні патрубки 17 з регулювальними шиберами 18. В кінці нижнього колосникового лотка 5 встановлено приймальний бункер 19.

Машина працює таким чином. При включенні привідних електродвигунів 11, їх ротори починають обертатись назустріч один одному у кожному віброприводі, що призводить до динамічної синхронізації їх обертання, внаслідок чого генеруються поступальні коливання лотків 4 і 5 під кутом β до площин їх робочих доріжок. Сипуча продукція подається через завантажувальну горловину на поверхню лотків, де під дією коливань розподіляється моношаром. Під дією коливань лотків між їх поверхнею і частинками сипучої продукції виникає асиметрія сил тертя, що призводить до виникнення направлено руху частинок сипучої продукції (вібротранспортування) вздовж поверхні лотків. При цьому точки поверхні лотків коливаються відносно деякого центру без направлено руху в цілому за період одного коливання. За допомогою зміни статичних моментів дебалансних вантажів 9 відносно осі обертання, встановлюється режим вібротранспортування із неперервним підкиданням частинок сипучої продукції під час їх переміщення вздовж лотків. Неперервне підкидання частинок продукції призводить до їх хаотичного повертання при переміщенні вздовж термічних лотків 4, над якими знаходяться ІЧ-нагрівачі 12 і сприяє їх рівномірному опроміненню з усіх боків інфрачервоним промінням, що призводить до інтенсивного, швидкого і рівномірного прогрівання зерен соняшнику. Для створення спрямованого потоку променевої енергії від ІЧ-нагрівачів на шар зерна над нагрівачами розміщений відбиваючий екран.

Після проходження термічних лотків, прогріта сипуча продукція подається через барабанні крильчатки 15 на колосникові лотки 5, де обдувається атмосферним повітрям від вентиляторів 16. При цьому,

неперервне хаотичне підкидання і повертання частинок продукції, також покращує рівномірність їх обдування повітрям, що призводить до порушення рівноважного стану вологи у частинках продукції, коли тиск парів води в них стає більшим за парціальний тиск парів води у повітрі, внаслідок чого волога починає інтенсивно випаровуватись. Сипуча продукція по чергово проходить через декілька термічних лотків 4 і відповідно через декілька колосникових лотків 5, що призводить до періодичного нагрівання і охолодження її частинок, а отже до створення оптимальних умов випаровування вологи, при невисокій максимальній температурі нагрівання частинок продукції.

ІЧ-нагрівачі встановлюють над транспортером на якому розміщено шар зерна соняшнику (2-3 зернини) паралельно зовнішній поверхні. Для створення спрямованого потоку променевої енергії від ІЧ-нагрівачів на шар зерна над нагрівачами та боковими стінками розміщений відбиваючий екран. Транспортування зерна вздовж ІЧ-випромінювачів супроводжується перемішуванням зернин нормально до поверхні транспортера, відповідно до [21] опромінення і відповідно ізотермічність шару зерна за висотою.

Оскільки інфрачервоне випромінювання термогенератора 12 дозволяє створити дуже інтенсивний тепловий потік, що сприяє швидкому прогріванню частинок продукції, а процес випаровування із них вологи вимагає більшого проміжку часу, то швидкість вібротранспортування на колосникових лотках 5 встановлюється більшою, а самі вони виготовляються із ширшими робочими доріжками.

Описана вище сушильна машина дозволяє зменшити питомі енерговитрати приблизно у 1,5-2 рази, зберігає усі переваги терморадіаційної сушильної машини, що описана вище, при цьому максимальна температура прогрівання частинок продукції у 1,5 – 2 рази менша при більших можливих межах зменшення їх вологості. Це дозволяє здійснювати більш якісний обробіток продукції при менших теплових витратах.

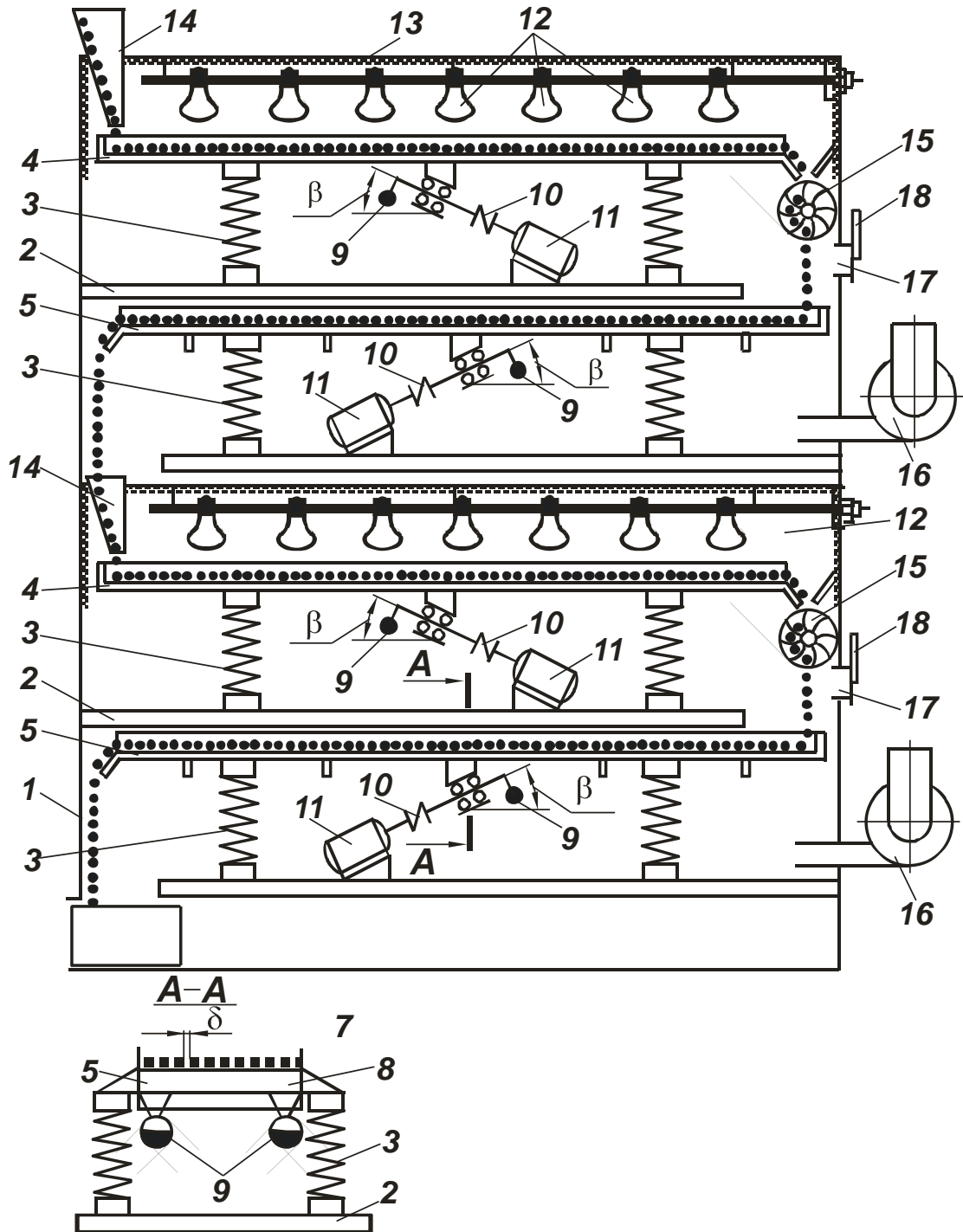


Рис. 3.4 Принципова схема вібраційної моношарної лоткової сушарки:

1 – корпус; 2 – опорні площадки; 3 – пружини; 4 – лоток суцільний; 5 – лоток колосниковий; 6 – завантажувальний бункер; 7 – смужка; 8 – кронштейн; 9 – вал з дебалансними вантажами; 10 – муфта еластична; 11 – привідні електродвигуни; 12 – лампа ІКЗ; 13 – термоізоляція; 14 – завантажувальні горловини; 15 – крильчатка барабанна; 16 – електроventильатор; 17 – патрубок; 18 – шибер; 19 – ємність для готової продукції

Проте, оскільки вихідна вологість сипучої продукції може коливатись у дуже широких межах, то для регулювання швидкості вібротранспортування сипучої продукції вздовж вібротоків, а отже часу їх обробки на кожному лотку, необхідно регулювати параметри коливань лотка, шляхом зміни величини і частоти коливань вимушуючої сили для забезпечення енергоощадного резонансного режиму роботи вібросушарки. Для вирішення поставленої задачі можна використовувати або дебалансний регульований вібропривід з регульованою величиною статичного дебалансу, або дебалансний вібропривід, у якому для живлення приводних електродвигунів використаний широко імпульсний регулятор частоти трифазного змінного струму, який дозволяє регулювати кутову швидкість приводних електродвигунів (а отже утримувати резонансну частоту коливань вібротоків та регулювати величину вимушуючої сили вібробуджувача).

Застосування для приводу вібросушарки вібраційного дебалансного приводу з автоматичною системою підтримання резонансного режиму роботи дозволяє: зменшити енергетичні затрати віброприводу вібромашини (3 - 10 разів), усунути сплеск амплітуди при перехідних процесах у вібротранспортуючій машині (ВТМ), стабілізувати продуктивності ВТМ при змінній масі завантаження робочого органу, зменшити металоємність конструкції дебалансного приводу ВТМ, зменшити динамічні та статичні навантаження на пари тертя в дебалансному приводі та збільшити термін експлуатації підшипників приводу ВТМ.

ВИСНОВКИ

1. Виконано комплексні експериментальні дослідження впливу режимних параметрів (питомого навантаження і потужності) на кінетику ІЧ-сушіння зерна соняшнику у вібраційній лабораторній інфрачервоній моношарній вібросушарці.
2. При збільшенні питомої потужності у 2 рази час процесу сушіння зменшується пропорційно. Не спостерігалось розтріскування лушпиння.
3. Параметрами ІЧ-сушіння зерна соняшнику лампами "OSRAM", що рекомендуються, на підставі проведених експериментальних досліджень варто вважати: висоту підвішування ІЧ-випромінювача при сушінні зерна $h=0,1\text{ м}$; $t_{\min} = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $t_{\max} = 44\text{ }^{\circ}\text{C}$.
4. Вібраційна моношарна сушарка переміжного інфрачервоного нагрівання дозволяє зменшити питомі енерговитрати приблизно у 1,2...1,3 рази порівняно з конвекційною сушаркою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Stankevich, G. M. (2003) *Sovremennaya sushka semyan podsolnechnika – zalog ikh kachestva isokhrannosti*. *Ol'yno-zhiroviy kompleks*, 2, 25-28.
2. [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://graindryers.ru/>
3. [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://www.kombikomi.de/>
4. Lykov, A. V. (1968) *Teoriya sushki*. M.:Energiya, 470.
5. Burdo, O.G. (2007) *Evolyutsiya sushil'nykh ustanovok*. Odessa, 368.
6. Il'yasov, S.G. Krasnikov, V.V. (1978) *Fizicheskiye osnovy infrakrasnogo oblucheniya pishchevykh produktov*. M.: Pishchevaya promyshlennost', 359.
7. Ginzburg, A. S. Vasil'yeva, A. S. (1965) *Kombinirovannaya sushka semyan podsolnechnika v kipyashchem sloye i infrakrasnymi luchami. Khraneniye i pererabotka zerna; TSINTI Goskomiteta zagotovok SSSR*, 4, 11–16.
8. Rogov, I.A. (1988) *Elektrofizicheskiye metody obrabotki pishchevykh produktov*. M.: Agropromizdat, 272.
9. Kotov, B.I. Bandura, V.M. Kalinichenko R.A. (2018) *Matematychnye modelyuvannya ta identyfikatsiya teplomasoperenosu v roslynnomu dyspersnomu materialy pry sushinni i nahrivanni elektromahnitnym polem. Enerhetyka i avtomatyka*, 6, 35–50.
10. Pawar, S.B. Thorat, B.N. (2011) *Infrared drying of alumina-silicateminerale cake*. *Drying Technology*, 29(7), 819–824.
11. Demidov, A.S. Voronenko, B.A. Demidov, S.F. (2011) *Sushka semyan podsolnechnika infrakrasnym izlucheniyyem*. *Novyye tekhnologii*, 3, 25-30.
12. Bandura, V. Kalinichenko, R. Kotov, B.SpirinA. (2018) *Theoretical rationale and identification of heat and mass transfer processes in vibration dryers with IR-energy supply*. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4/8(94), 50-58.
13. Oleg Burdo, Valentyna Bandura, Aleksandr Zykov, Igor Zozulyak, Julia Levtrinskaya, Elena Marenchenko (2017) *Development of wave technologies to*

intensify heat and mass transfer processes. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4/11(88), 34-42.

14. Ranjbaran, M. Zare, D. (2012) A new approach for modeling of hot air-microwave thin layer drying of soybean. Electron. J. Pol. Agric. Univ, 15 (3), 1-11.

15. Tanaka, F. Yamashita, K. Tanaka, A. Tanaka, F. Hamanaka, D. Uchino, T. (2014) High temperature drying characteristics of crushed rice for animal feed. Eng. Agr. Environ. Food, 7 (3), 133-138.

16. Hasan, A.M. Bala, B.K. Rowshon, M.K. (2014) Thin layer drying of hybrid rice seed. Eng. Agr. Environ. Food, 7 (4), 169- 175.

17. Пат. № 45431 Україна, МПК F26B5/00. Спосіб вібромоношарного сушіння/ Л. В. Ярошенко; заявник та патентовласник Вінницький державний сільськогосподарський інститут. № 98073470; заявл. 02.07. 1998; опубл. 15.04. 2002, Бюл. № 4, 3 с.

18. Goncharevich, I. F. (1972) Dinamika vibratsionnogo transportirovaniya. Moskva: Nauka, 212.

19. Yaroshenko, L.V. (2011) Vibratsiyna shakhtna susharka. Vibratsii v tekhnike i tekhnologiyakh, 1 (17), 44 - 46.

20. Пат. № 105075 С2 Україна, МПК B65G 27/24. Спосіб стабілізації швидкості горизонтального вібротранспортування в адаптивних вібраційних технологічних машинах./ Л. В. Ярошенко, Р.В. Чубик; заявник та патентовласник Вінницький національний аграрний університет. №201206929; заявл. 06.06. 2012; опубл. 10.04. 2014, Бюл. № 23, 5 с.

21. Пат. № 116418 С2 Україна, МПК B06B 1/16. Керований вібропривод напрямленої дії зі спареними дебалансами./ Л. В. Ярошенко, Р.В.Чубик, В.М. Бандура, В.В. Томчук, Н.М. Зрайло; заявник та патентовласник Вінницький національний аграрний університет. №201609034; заявл. 25.08. 2016; опубл. 12.03. 2018, Бюл. № 4, 5 с.