

# **НАУКОВА РОБОТА**

**на тему:**

**«Дослідження процесу сушіння високовологого  
насіння гарбуза у вібраційній сушарці»**

**Шифр «Вібраційна сушарка»**

## Анотація

В анотації наукової роботи під шифром «*вібраційна сушарка*» можна відзначити наступне.

Одним із важливих етапів виробництва насіння баштанних культур є його післязбиральна обробка, яка включає в себе процес сушіння, що є основним і одним із ефективних методів зберігання та переробки сільськогосподарської сировини. Сушіння високовологого насіння гарбузів, як правило, здійснюється у барабанних і шахтних сушарках, жодна з яких не забезпечує поєднання високої якості, швидкості здійснення процесу і низьких енерговитрат.

Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є застосування коливань на оброблюваний насінневий матеріал, що докорінно змінює його властивості та призводить до зменшення в'язкості і тертя між частками технологічного завантаження, в залежності від режимів коливань, на один-два порядки. Така дія забезпечує складну траєкторію руху кожної частки з можливістю її регулювання, що, в свою чергу, забезпечує значне збільшення та інтенсивне оновлення поверхні насінини, пришвидшення дифузії під час сушіння. Таким чином, дослідження та розробка вібраційної сушарки для інтенсифікації сушіння високовологого насіння гарбуза у післязбиральний період є актуальним і необхідним.

В даній науковій роботі розглядається вібраційна сушарка для реалізації якісного процесу сушіння високовологого насіння гарбуза під час післязбиральної обробки. На основі теоретичного аналізу означеної машини та досліджуваного процесу отримані аналітичні та графічні залежності для її основних характеристик, що стало підставою для обґрунтування експлуатації розробленого обладнання.

Наукова значущість роботи полягає в створенні якісно нової техніки для післязбиральної обробки та оптимізації параметрів процесу сушіння насінневого матеріалу, а саме: розглянуто сучасний стан технології та техніки для сушіння високовологого насіння гарбуза під час його післязбиральної обробки; на основі проаналізованих методів зниження енерговитрат та підвищення якості продукції розроблено вібраційну сушарку; досліджено особливості проведення технологічного процесу.

*Ключові слова:* післязбиральна обробка, сушіння, гарбузи, високовологе насіння, вібрація, раціональні параметри, продуктивність, енерговитрати, якість.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	3
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТАНУ ПІСЛЯЗБИРАЛЬНОЇ ОБРОБКИ НАСІННЯ БАШТАННИХ КУЛЬТУР .....	4
1.1 Структура виробництва насіння гарбуза в Україні.....	4
1.2 Причини і фактори зниження посівних якостей насіння .....	6
1.3 Аналіз технічної бази та способів сушіння насіння гарбуза .....	8
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ НАСІННЯ ГАРБУЗА У СУШИЛЬНІЙ КАМЕРІ ВІБРАЦІЙНОЇ СУШАРКИ .....	13
2.1 Аналітичні дослідження руху насіння гарбуза .....	13
2.2 Визначення коефіцієнта рухливості .....	14
РОЗДІЛ 3 ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	16
3.1 Розробка дослідної вібраційної сушарки для сушіння високовологого насіння гарбуза .....	16
3.2 Експериментальне оснащення .....	19
РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЕКОНОМІЧНИЙ ЕФЕКТ ВІД ВИКОРИСТАННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ СУШАРКИ..	21
4.1 Кінетика сушіння високовологого насіння гарбуза.....	21
4.2 Економічний ефект від використання розробленої сушарки.....	26
ВИСНОВКИ.....	30
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	31

## ВСТУП

Основним технічним завданням аграрного виробництва в галузі насінництва є отримання кондиційного насіння, яке відповідає державним та міжнародним стандартам якості. Цього можливо досягти тільки за чіткого дотримання технологій і використання обладнання, яке їх забезпечить. Від ступеня досконалості проведення цього процесу залежать економічні показники виробництва, витрати енергетичних ресурсів і, як результат, продуктивність, товарна якість та собівартість насінницької продукції.

Одним із важливих етапів вирощування насіння сільськогосподарських культур є його післязбиральна обробка, яка включає в себе процес сушіння, що є основним і одним із ефективних методів зберігання і переробки сільськогосподарської сировини.

В зв'язку з цим виникає необхідність в розробці нових способів сушіння, які забезпечили б високу якість готового продукту, створення умов для повної і своєчасної обробки зібраного урожаю, зменшення втрат, автоматизацію, механізацію та значну інтенсифікацію цього процесу, а також зменшення питомих енерговитрат.

Вплив низькочастотних коливань на дисперсні системи докорінно змінює їхні властивості, що призводить до зменшення в'язкості і тертя між частками технологічного завантаження, в залежності від режимів коливань, на один-два порядки. Така дія забезпечує складну траєкторію руху кожної частки з можливістю її регулювання, що, в свою чергу, забезпечує значне збільшення та інтенсивне оновлення поверхні насінини, пришвидшення дифузії під час сушіння.

Застосування вібраційного обладнання для сушіння особливо ефективно у високотехнологічних процесах, що мають місце у насінницькій, харчовій, медико-біологічній, хімічній галузях та інших, де вологість продукту – найголовніша умова реалізації технології.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ СТАНУ ПІСЛЯЗБИРАЛЬНОЇ ОБРОБКИ НАСІННЯ БАШТАННИХ КУЛЬТУР

#### 1.1 Структура виробництва насіння гарбуза в Україні

Протягом останніх п'яти років Україна і надалі зміцнює свої позиції на міжнародному аграрному ринку та впевнено перебуває в світовій десятці виробників зерна. Оскільки внутрішні потреби країни в зерні щороку становлять у межах 29 млн. т, то збільшення загального його виробництва позитивно впливає на зростання експортного потенціалу країни [1-3].

Звичайно, що з року в рік у структурі посівних площ сільськогосподарських культур переважають зернові культури, займаючи близько 55,0%, а на картоплю і овочештанні культури припадає близько 8,0%. У виробничій структурі аграрного сектору серед продукції рослинництва переважають зернові культури із 26,0%, потім технічні культури – 20,0%, картопля та овочештанні культури – 18,0% усього виробництва сільськогосподарської галузі України [2-3].

Серед овочештанних культур зростають обсяги вирощування гарбуза за останні десять років сягають 600 тис. т. (рис. 1.1, 1.2) Лідерами з вирощування гарбузів в Україні є південні регіони, хоча із глобальним потеплінням і зміною кліматичних умов посівні площі цієї культури поступово збільшуються і у центральних областях України. Так на теренах нашої держави успішно розвивають свій «баштанний» бізнес, в основному забезпечуючи потреби закордонних партнерів, такі агропідприємства як: корпорація «Сварог Вест Груп» вирощує баштанні культури на площі 3,5 тис. га і має власний насінневий завод ТОВ «Лотівка Еліт», компанія «Голденкерн» (Австрія) домовляються із сільськогосподарськими підприємствами у Вінницькій, Житомирській, Полтавській, Рівненській, Хмельницькій областях, група із 16 агропідприємств «Агротрейд», ТОВ «Придонецьке» агрохолдингу «Landfort», який є структурним підрозділом ДК ВКВ Group, ТОВ «Лампка Агро», ФГ

«Степове», компанія «Kasan».

■ Урожайність, т/га ■ Зібрана площа, тис. га

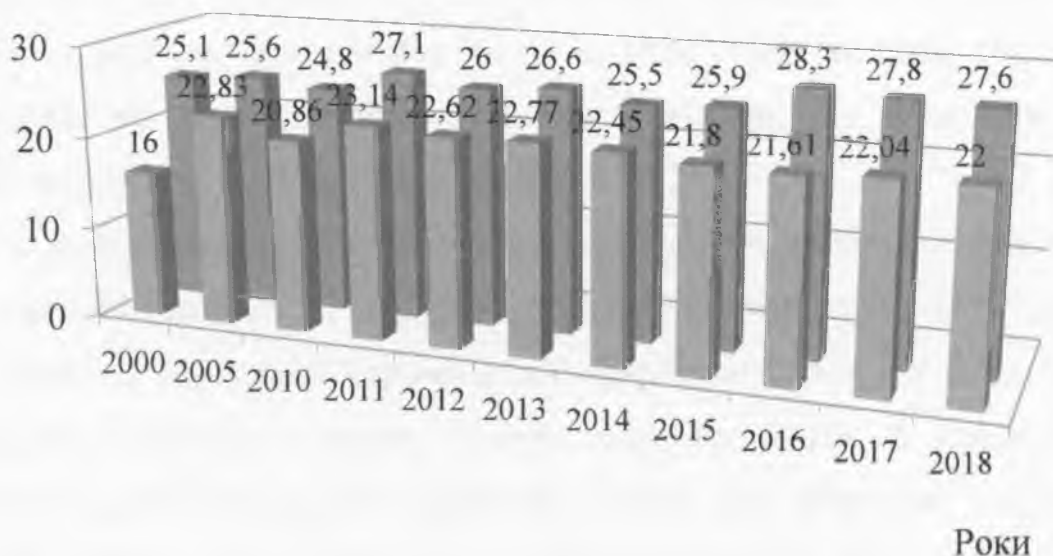


Рисунок 1.1 – Виробництво гарбуза в Україні

Валовий збір, тис. тон

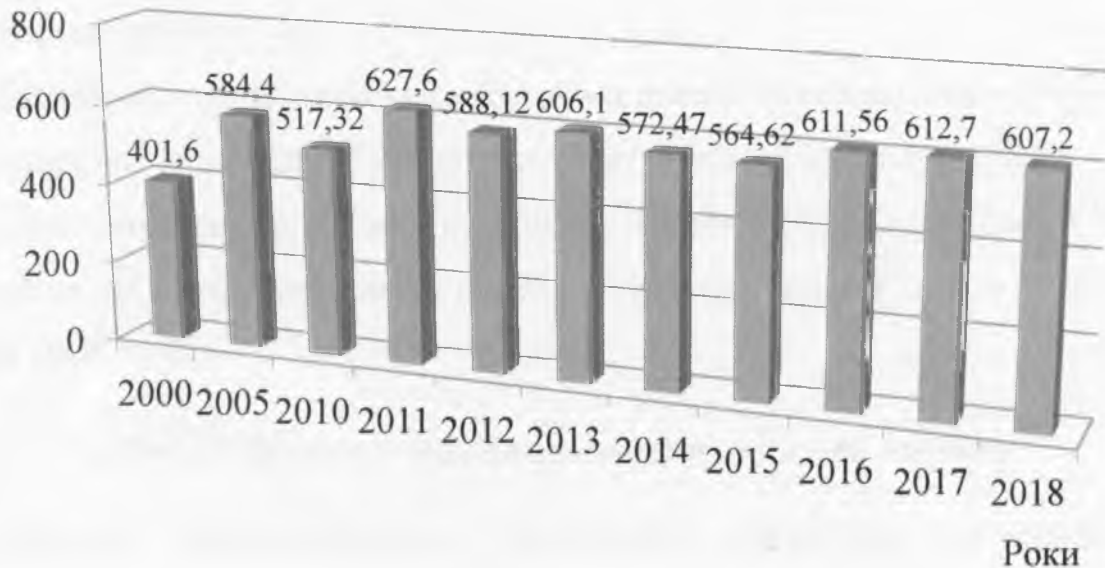


Рисунок 1.2 – Валовий збір гарбуза в Україні

Щороку площі під баштаними культурами зростають у всьому світі і на 2019 рік становили майже 2 млн. га, демонструючи щорічне зростання виробництва цих культур на 2,2% [4]. Враховуючи те, що стабільним

залишається попит на гарбузове насіння в США, Китаї, Росії та Індії, де гарбуз вирощується у великих кількостях, а також на Близькому Сході і те, що він зростає на внутрішньому і європейському ринках, то до потенційних споживачів можуть приєднатися Австрія, Німеччина, Бельгія, Португалія і Нідерланди, які є важливими торговими центрами, що дозволить Україні успішно розвивати і більш віддалені напрямки [5].

На фоні зростаючого попиту на насіння гарбуза суттєво зростає попит на його посівний матеріал та продукти переробки, зокрема: м'якоть, гарбузову олію, жмих. З гарбузової сировини в Україні виготовляють пюре, їстівний концентрат, заправки і соуси, цукати, пастилу, БАДи, а також годують м'якоттю худобу. Ще однією перевагою з точки зору фермерів є те, що після збирання гарбузів на полі залишається багато клітковини, яка дуже корисна для ґрунту, що вказує на те, що гарбуз являється прекрасним попередником для більшості культурних рослин. Також аграрії вважають гарбуз нішевою культурою, яка страхує господарство від неврожаю основних культур завдяки своїй посухостійкості [4].

Виробництвом займаються переважно великі агроформування, які мають змогу придбати відповідну техніку для збору та післязбиральної обробки. Хоча і невеликі господарства, які мають незначні земельні ресурси, неабиякий інтерес проявляють до такої рентабельної культури, оскільки цей показник в середньому складає 30-35% [4].

## **1.2 Причини і фактори зниження посівних якостей насіння**

Насіння характеризується сортовими, посівними і урожайними властивостями. При цьому велике значення мають фізичні властивості насіннєвого матеріалу – натура і вирівняність.

Основні посівні якості насіння характеризуються такими показниками, як чистота, вологість, енергія проростання, лабораторна схожість, маса 1000 насінин.

Категорії насіння і показники якості його визначаються і регла-

ментуються державним стандартом України ДСТУ 2240-93 [6].

Від схожості насіння залежить його посівна якість. Схожість насіння формується у процесі вирощування і значною мірою залежить від ґрунтово-кліматичних умов, технології вирощування, системи удобрення. На якість насіння впливає його дозрівання та організація збирання врожаю, а також його післязбиральна обробка (очищення, сушіння, калібрування). Тому на стадії обробки урожаю необхідно вибирати раціональний режим сушіння насіння, його очищення, уникати збільшення операцій у процесі доробки насіння.

Пошкодження насіння знижує посівні якості його при зберіганні. Так, через 8 міс. після збирання енергія проростання пошкоджених насінин знижується на 30-40 %, а лабораторна схожість на 62-89 %.

Одним із основних заходів зменшення шкоди від травмування є протруєння зерен, яке нейтралізує шкідливу негативну дію мікроорганізмів на насіння. Протруєння слід поєднувати з інкрустацією, додаючи пестициди до плівкоутворювача. При цьому треба диференційовано підходити до виду і норми протруєння, уникати препаратів, які містять ртуть (наприклад, гранозан). Протруєння з інкрустацією слід проводити перед сівбою. Не варто завчасно протруєвати насіння з підвищеною вологістю.

Збереженість посівного матеріалу значною мірою залежить від його вологості. У більшості культур в умовах України вологість насіння не повинна перевищувати 15 %. Таке насіння добре зберігається протягом тривалого періоду без зниження якостей.

В зерновому насипу відбуваються процеси біо-, газо-, тепло- і вологообміну, як на рівні однієї зернини, так і в насипу в цілому [7].

Сушіння насіння в зерносушарках із порушенням вимог до їх експлуатації, без урахування ботанічних особливостей і фізичних властивостей, початкової вологості насіння, типу зерносушарок та режимів сушіння є однією з причин зниження посівних якостей. Сушіння, яке виконується із врахуванням усіх факторів, сприяє дозріванню насіння у післязбиральний період і підвищенню його життєздатності.

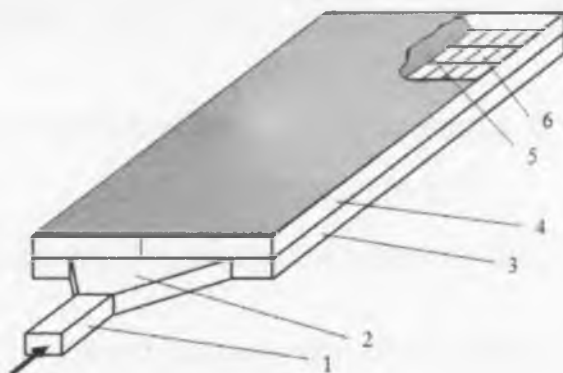


### 1.3 Аналіз технічної бази та способів сушіння насіння гарбуза

Відповідно до великих об'ємів переробки врожаю баштанних культур створювалась технічна база – високопродуктивні агрегати ліній ЛСТ-10, ЛСБ-20 [8, 9], які характеризуються недосконалістю технологічного процесу.

Способи видалення вологи з матеріалів можна звести до трьох основних – фізико-хімічного, механічного і теплового [10].

Ряд сільгосп підприємств, зокрема, фермерських, які займаються виробництвом товарного та посівного насіння гарбузів, процес сушіння забезпечують власними силами, використовуючи засоби для сушіння в шарі, в яких насіння перебуває в стані нерухомого насипу (рис. 1.3).



1 – вентиляційний короб; 2 – дифузор; 3 – основа, 4 – стінка; 5 – насіння гарбузів; 6 – решітчасте днище

Рисунок 1.3 – Принципова схема установки для сушіння насіння гарбузів в нерухомому шарі

Одним із небагатьох українських підприємств, які освоїли випуск сушарок для насіння баштанних культур, є Каховський експериментальний механічний завод. Їх розробка – сушильний стіл V-КВ 15/3 (рис. 1.4), який складається з рами, робочого полотна, каретки зі шнеками для перемішування і шибером для рівномірного розподілу зерна по столу та вивантаження, вентилятора високого тиску і теплогенератора [11].

Сировина подається на робочу зону стола в будь-якому місці, звідки кареткою розподіляється рівномірно по усій поверхні робочого полотна. Після

завершення завантаження стола вмикається теплогенератор і за допомогою відцентрового вентилятора відбувається обдування зерна теплим повітрям. Розподіл потоків повітря в столі виконують вбудовані регульовані розподільники потоку.



а)

б)

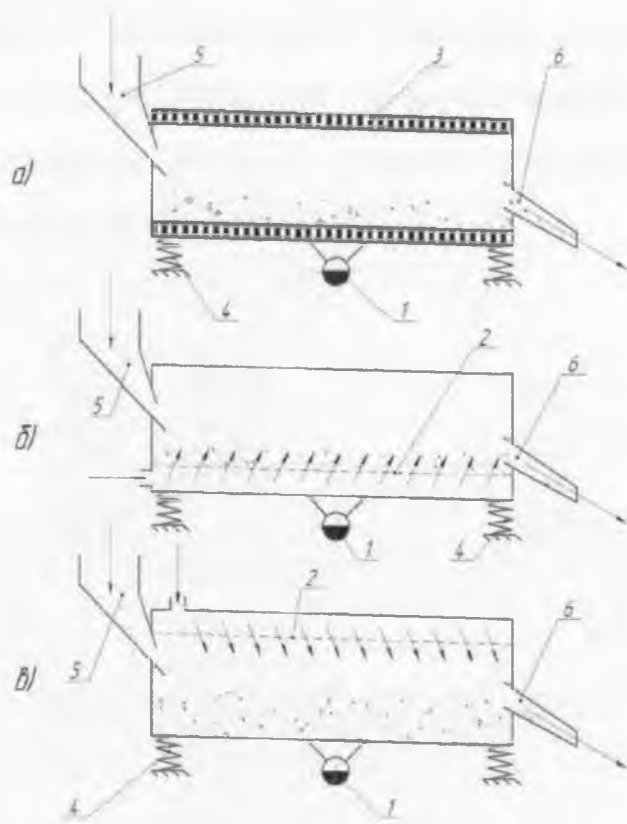
а – сушильний стіл із шнековими перемішувачами; б – сушильний стіл із завантаженим насінням

Рисунок 1.4 – Загальний вигляд сушильного стола V-КВ 15/3

Сушіння є досить енергоємним процесом, тому, з метою покращення енергетичних параметрів широке застосування знаходять пристрої з активними гідродинамічними режимами, зокрема, в киплячому шарі з його модифікаціями: аерокиплячому, віброкиплячому та аеровіброкиплячому шарі (АКШ, ВКШ та АВКШ відповідно) [12].

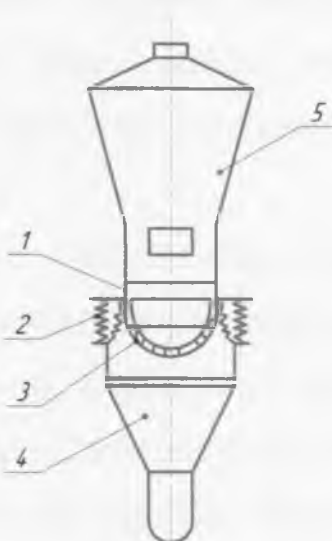
Для сушіння продукції, схильної до злипання, використовуються вібраційні установки з криволінійною формою поверхні в зоні контакту фаз. Завдяки обтічній формі таких поверхонь, не утворюються застійні зони, що виключає нерівномірний прогрів та перегрів матеріалу, частки матеріалу активно перемішуються, процес тепломасообміну інтенсифікується.

Прикладом сімейства таких сушарок може бути ряд пристроїв, розроблених львівськими вченими [9]. Вібраційна сушарка, перфороване днище якої має U-подібну форму, представлена на рис. 1.5, 1.6.



а – від вібруючої поверхні; б – від вібруючої поверхні з нижньою подачею сушильного агента; в – від вібруючої поверхні з верхньою подачею сушильного агента; 1 – віброзбуджувач; 2 – перфороване днище; 3 – нагрівальний елемент; 4 – пружний елемент; 5 – завантажувальний бункер; 6 – вивантажувальний лоток

Рисунок 1.5 – Способи створення ВКШ

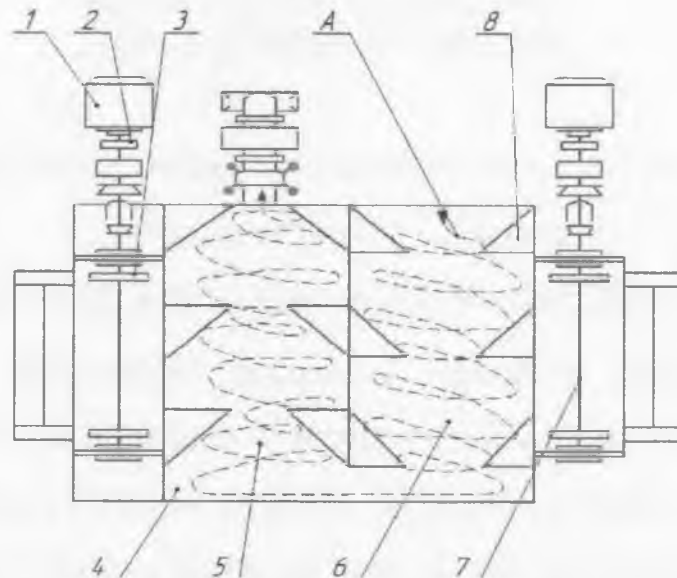


1 – еластичне з'єднання; 2 – пружні елементи; 3 – перфорована решітка;  
4 – дифузор; 5 – сушильна камера

Рисунок 1.6 – Схема лоткової конвективної вібраційної сушарки

Решітчасте днище U-подібної форми обладнане інерційним дебалансним вібробуджувачем, який надає сушильній камері коливання.

Вали вібробуджувачів лоткової сушарки розміщені на протилежних торцевих стінках робочого органу (рис. 1.7).



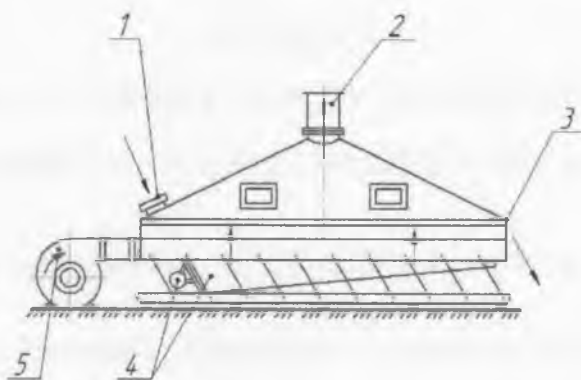
1 – електродвигун; 2 – еластична муфта; 3 – дебаланси; 4 – сушильна камера;  
5, 6 – контейнери робочого органу; 7 – вал вібропривода; 8 – направляючі  
перегородки

Рисунок 1.7 – Схема вібраційної сушарки з валами вібробуджувачів, які розміщені вздовж сушильних камер із зовнішньої сторони

В сушарці, розробленій фірмою «Ешервіс» (Німеччина), вібрації піддається лоток, по якому переміщається псевдозріджений шар (рис. 8) матеріалу, всі частки якого інтенсивно рухаються, згустки розпушуються, чим виключається налипання [13].

В сушильних установках АВКШ створюється активний гідродинамічний режим, при якому постійно оновлюється поверхня теплообміну. Тому процес відбувається більш інтенсивно, порівняно з іншими способами сушіння в стрічкових, шахтних, барабанних, а також в сушарках АКШ.

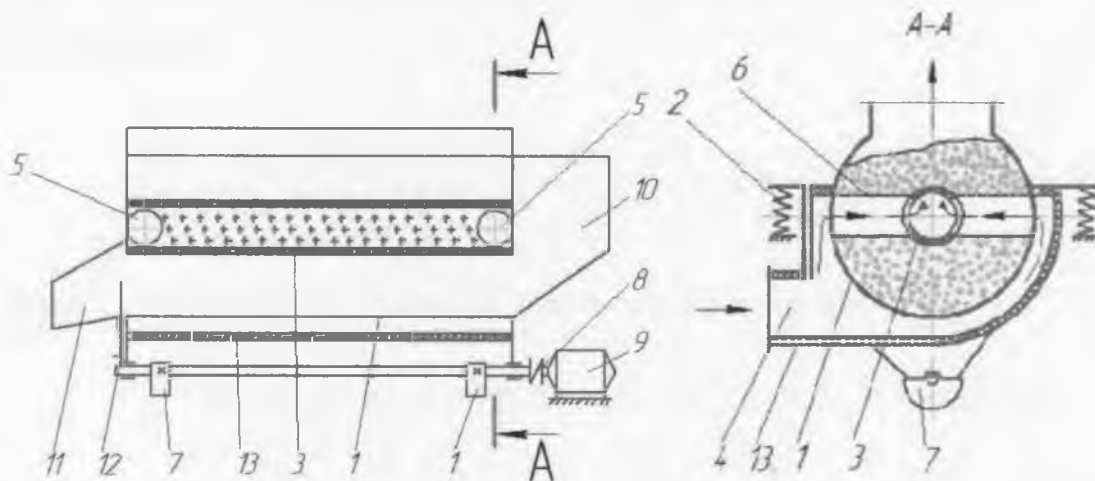
В сушильних установках АВКШ створюється активний гідродинамічний режим, при якому постійно оновлюється поверхня теплообміну. Тому процес відбувається більш інтенсивно, порівняно з іншими способами сушіння в стрічкових, шахтних, барабанних, а також в сушарках АКШ [14].



- 1 – завантажувальний отвір; 2 – витяжний канал; 3 – вихідний отвір;  
4 – вібробуджувач; 5 – вентилятор

Рисунок 1.8 – Сушильний агрегат з коливним транспортером і киплячим шаром

Конструкція вібраційної сушильної установки передбачає поєднання кондуктивного та конвективного способів сушіння (рис. 1.9) [14]. Поєднання конвективного і кондуктивного сушіння зменшує витрати сушильного агента, збільшує об'єм заповнення сушильної камери, що значно інтенсифікує процес сушіння. Конструкція сушарки забезпечує її високу жорсткість і міцність, але не виключає налипання на гріючі поверхні матеріалів з підвищеними когезивно-адгезивними властивостями і потребує дооснащення засобами очищення.



- 1 – сушильна камера; 2 – пружня підвіска; 3 – пустотілий циліндр;  
4 – газовідвідний короб; 5 – вікно; 6 – перетічний канал; 7 – вібратор; 8 – пружня муфта; 9 – електродвигун; 10 – завантажувальний отвір; 11 – розвантажувальний лоток; 12 – шибер; 13 – теплоізоляція

Рисунок 1.9 – Схема вібраційної сушарки з конвективно-кондуктивним підведенням тепла

## РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ НАСІННЯ ГАРБУЗА У  
СУШИЛЬНІЙ КАМЕРІ ВІБРАЦІЙНОЇ СУШАРКИ

## 2.1 Аналітичні дослідження руху насіння гарбуза

Основоположні рівняння динаміки і статички насіннєвого середовища можуть бути представлені слідуючими групами рівнянь [15-19].

Перша група рівнянь. Рівняння динаміки руху середовища:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = X; \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = Y; \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = Z, \end{aligned} \quad (2.1)$$

де  $u, v, w$  – компоненти переміщень елементів середовища, м/с;

$\rho$  – густина середовища, кг/м<sup>3</sup>;

$X, Y, Z$  – масові (об'ємні сили), Н/м<sup>3</sup>.

Для випадку статички, рівняння (2.1) за відсутності інерційних складових набудуть вигляду:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = X; \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = Y; \quad \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = Z. \quad (2.2)$$

Друга група рівнянь. Рівняння рівноваги на поверхні:

$$\sigma_x l + \tau_{xy} m + \tau_{xz} n = \bar{X}; \quad \sigma_y m + \tau_{yz} n + \tau_{xy} l = \bar{Y}; \quad \sigma_z n + \tau_{xz} l + \tau_{yz} m = \bar{Z}, \quad (2.3)$$

де  $l, m, n$  – напрямні косинуси зовнішньої нормалі до поверхні, яка обмежує середовище, тобто контактної поверхні «середовище-стінка»;

$\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$  – компоненти проєкцій розподілених по поверхні контакту сил на відповідні осі координат, Па.

Третя група рівнянь. Геометричні рівняння, без врахування складових другого порядку малості (квадрати перших похідних і другі похідні), (рівняння

Коші):

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}; \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial x}; \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial x};$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}; \gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}; \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}. \quad \dot{\varepsilon}_x = \frac{\partial \dot{u}}{\partial x}; \dot{\varepsilon}_y = \frac{\partial \dot{v}}{\partial y}; \dot{\varepsilon}_z = \frac{\partial \dot{w}}{\partial z}; \quad (2.4)$$

$$\dot{\gamma}_{xy} = \frac{\partial \dot{u}}{\partial y} + \frac{\partial \dot{v}}{\partial x}; \dot{\gamma}_{yz} = \frac{\partial \dot{v}}{\partial z} + \frac{\partial \dot{w}}{\partial y}; \dot{\gamma}_{zx} = \frac{\partial \dot{w}}{\partial x} + \frac{\partial \dot{u}}{\partial z}. \quad (2.5)$$

де  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \dot{\varepsilon}_x, \dot{\varepsilon}_y, \dot{\varepsilon}_z$  – компоненти відносних нормальних деформацій та їх швидкостей, відповідно;

$\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}, \dot{\gamma}_{xy}, \dot{\gamma}_{xz}, \dot{\gamma}_{yz}$  – компоненти відносних зсувних деформацій та їх швидкостей, відповідно;

$\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}$  – компоненти швидкостей середовища.

Четверта група рівнянь. Рівняння сумісності деформацій:

$$\frac{\partial^2 \dot{\gamma}_{xy}}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 \dot{\varepsilon}_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \dot{\varepsilon}_y}{\partial x^2}; \quad \frac{\partial^2 \dot{\gamma}_{yz}}{\partial y \partial z} = \frac{\partial^2 \dot{\varepsilon}_y}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \dot{\varepsilon}_z}{\partial y^2}; \quad \frac{\partial^2 \dot{\gamma}_{zx}}{\partial z \partial x} = \frac{\partial^2 \dot{\varepsilon}_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{\varepsilon}_x}{\partial z^2}; \quad (2.6)$$

$$2 \frac{\partial^2 \dot{\varepsilon}_x}{\partial y \partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( -\frac{\partial \dot{\gamma}_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \dot{\gamma}_{zx}}{\partial y} + \frac{\partial \dot{\gamma}_{xy}}{\partial z} \right); \quad 2 \frac{\partial^2 \dot{\varepsilon}_y}{\partial z \partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial \dot{\gamma}_{yz}}{\partial x} - \frac{\partial \dot{\gamma}_{zx}}{\partial y} + \frac{\partial \dot{\gamma}_{xy}}{\partial z} \right);$$

$$2 \frac{\partial^2 \dot{\varepsilon}_z}{\partial y \partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial \dot{\gamma}_{yz}}{\partial x} - \frac{\partial \dot{\gamma}_{zx}}{\partial y} + \frac{\partial \dot{\gamma}_{xy}}{\partial z} \right); \quad (2.7)$$

П'ята група рівнянь. Рівняння нерозривності середовища:

$$\frac{d\rho(x, y, z, t)}{dt} + \left( \frac{\partial(\dot{u}\rho(x, y, z, t))}{\partial x} + \frac{\partial(\dot{v}\rho(x, y, z, t))}{\partial y} + \frac{\partial(\dot{w}\rho(x, y, z, t))}{\partial z} \right) = 0 \quad (2.8)$$

## 2.2 Визначення коефіцієнта рухливості

Не вдаючися у подробиці виведення залежностей коефіцієнтів рухливості сипкого середовища можна навести кінцеві залежності таких коефіцієнтів, що отримані Зенковим Р.Л. [20].

Так для ідеально сипкого середовища в «нестиснених» умовах коефіцієнт рухливості у докритичному стані з урахуванням критерію початку руху виражається залежністю:

$$m_i = \frac{\sqrt{1+f^2}-f}{f+\sqrt{1+f^2}}; m_i = \frac{\sqrt{1+(tg\varphi)^2}-tg\varphi}{tg\varphi+\sqrt{1+(tg\varphi)^2}} \dots \quad (2.9)$$

В умовах обмеження насінневого середовища стінками робочої камери до залежностей коефіцієнтів рухливості входять величини, що визначають кути зовнішнього тертя між самим середовищем та стінками.

Коефіцієнт рухливості біля стінок визначається залежністю:

$$m_s \rightarrow \frac{1}{2\sqrt{((tg\varphi)^2+1)(tg\varphi\left(\frac{\tau_0}{\sigma_v}+tg\varphi\right)-(tg\varphi)^2)+2(tg\varphi)^2\left(\frac{\tau_0}{\sigma_v}+tg\varphi\right)+1}}, \quad (2.10)$$

де  $\sigma_v$  – проекція середнього нормального напруження на нормаль до поверхні стінки.

Проекція середнього нормального напруження на нормаль до поверхні стінки визначається залежністю:

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_{xv}^2 + \sigma_{yv}^2 + \sigma_{zv}^2}, \quad (2.11)$$

де  $\sigma_{xv}, \sigma_{yv}, \sigma_{zv}$  – компоненти проекцій нормальних напружень на нормаль до поверхні стінки.

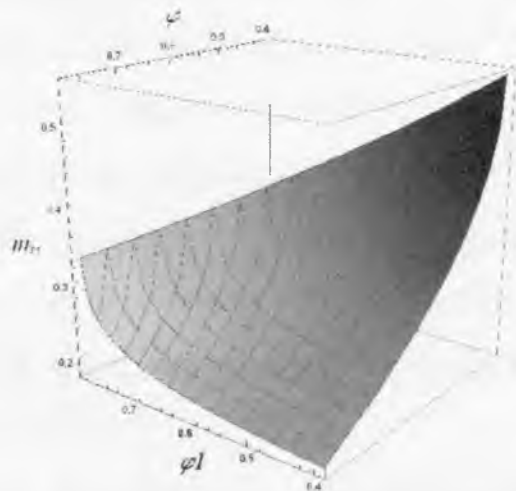


Рисунок 2.1 – Залежність коефіцієнта рухливості ідеально сипкого середовища біля стінки від кутів внутрішнього та зовнішнього тертя



## РОЗДІЛ 3

### ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 3.1 Розробка дослідної вібраційної сушарки для сушіння високовологого насіння гарбуза

Вирішенню поставленої задачі виконання якісного сушіння високовологого насіння гарбуза найбільше відповідають вібраційні установки. Надання днищу установки U-подібної форми сприяє виключенню застійних зон, дає можливість введення в об'єм робочої камери перемішуючих пристроїв, а також сприяє організації транспортування продукції у поздовжньому напрямку.

Для реалізації досліджень раціональною є конструктивно-технологічна схема вібраційної сушарки, яка реалізує послідовно фільтраційний та конвективний етапи сушіння високовологого насіння гарбуза (рис. 3.1) та виготовлений дослідно-промисловий зразок (рис. 3.2).

Вібраційна сушарка складається з U-подібної робочої камери 1, яка за допомогою пружних елементів 2 встановлена на нерухомій основі і оснащена дебалансним віброзбуджувачем 3 та двома газорозподільчими решітками, одна з яких виконана у вигляді пустотілого циліндра 4 з перфорованою поверхнею, розміщеного по горизонтальній вісі робочої камери 1 в шарі матеріалу, який висушується. Циліндр 4, на якому симетрично жорстко закріплено дві П-подібні лопаті 5 з еластичними скребками 6, з однієї (торцевої) сторони, яка виходить за межі робочої камери 1, за допомогою пружно-поворотного (еластичного) з'єднання 7 суміщений (з'єднаний) з системою подачі (відбору та формування) сушильного агента 8, а з іншої (протилежної) – з приводом, який забезпечує його обертальний рух.

Друга розподільча решітка є, власне, перфорованим днищем робочої камери 1, яке жорстко з'єднане з газорозподільчим коробом – дифузором 10,

який через пружне еластичне з'єднання 11 суміщений з системою подачі, відбору та формування сушильного агента 9.

Робоча камера 1 у верхній панелі 13 має завантажувальний отвір 14, а на рівні днища – розвантажувальний лоток 15.

На першому етапі процесу підігрітий сушильний агент з системи (формування) подачі (та відбору) сушильного агента 9 через пружно-поворотне (еластичне) з'єднання 7 поступає у внутрішню частину пустотілого циліндра 4 з перфорованою боковою поверхнею, через яку подається в шар оброблюваного матеріалу 5, проходить через нього зверху вниз і проникає через перфороване днище робочої камери 1 в дифузор 10, в якому створюється розрідження. Відпрацьований вологий охолоджений сушильний агент виводиться з дифузора 10 через пружне (еластичне) з'єднання 11 системою (формування) подачі (та відбору) сушильного агента 8.

На другому етапі підігрітий сушильний агент з системи (формування) подачі (та відбору) сушильного агента 8 через дифузор 10, перфороване днище робочої камери 1 подається в шар оброблюваного матеріалу, проходить через нього знизу вгору і видаляється з робочої камери 1.

Матеріал завантажується в робочу камеру 1. Під дією віброзбуджувача 3, який створює коливання робочої камери 1 і потоку сушильного агента, матеріал переходить у віброкиплячий стан і рівномірним шаром заповнює сушильну камеру 1. За рахунок фільтраційних, гідродинамічних процесів, вібрації, взаємодії з рухомим підігрітим сушильним агентом та внаслідок розрідження в дифузорі 10, яке створюється системою (формування) подачі (та відбору) сушильного агента 8, поверхнева волога з матеріалу інтенсивно видаляється разом з сушильним агентом через перфороване днище робочої камери 1. Дві П-подібні лопаті з еластичними скребками, які приводяться в обертальний рух зовнішнім (окремим) приводом забезпечують очищення перфорованих поверхонь робочої камери і циліндра 4 від залишків матеріалу, який висушується, та сприяють додатковому його перемішуванню.

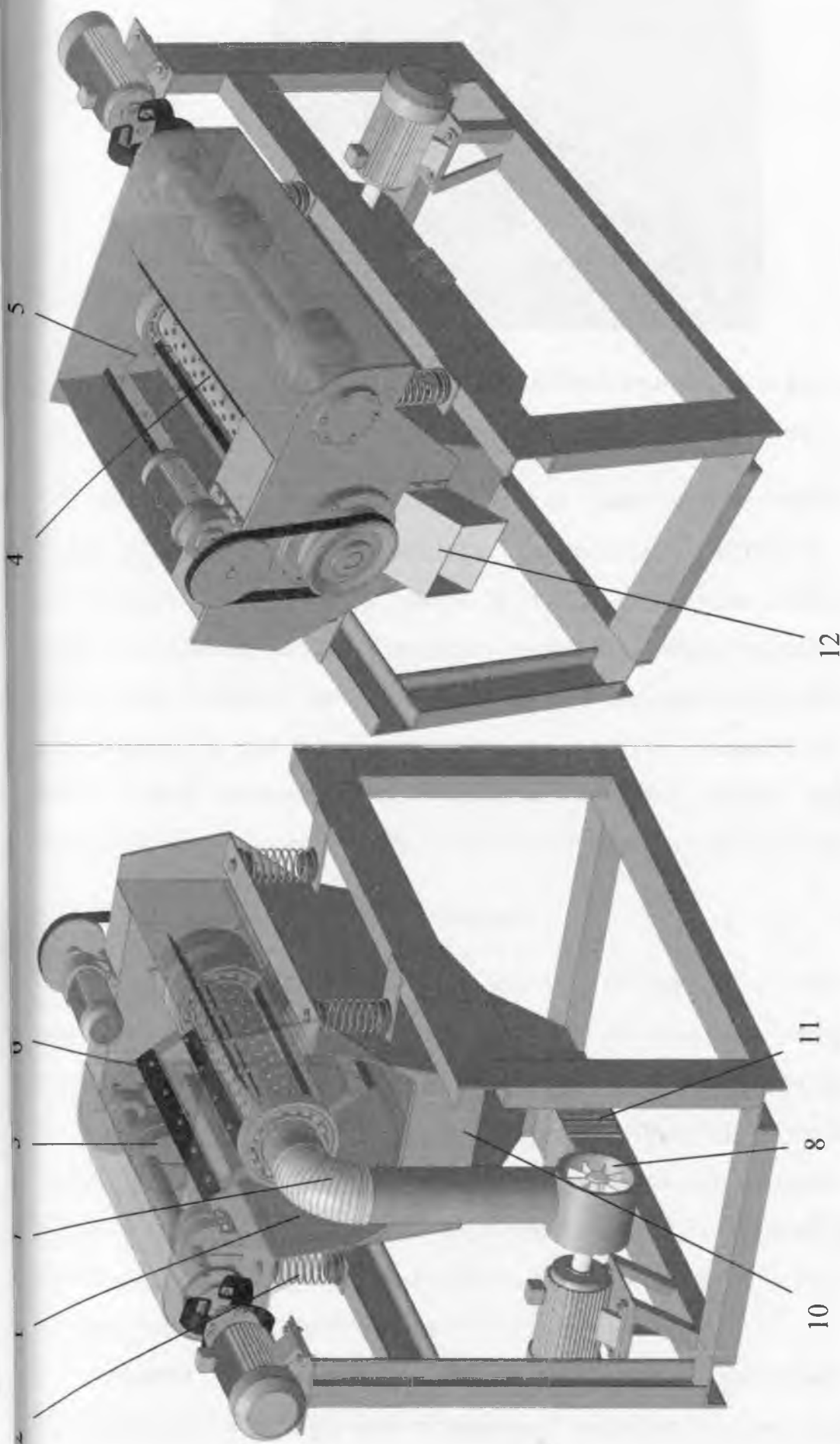


Рисунок 3.1 – 3-D модель дослідної вібраційної сушарки для фільтраційно-конвективного сушіння високовологого насіння гарбуза



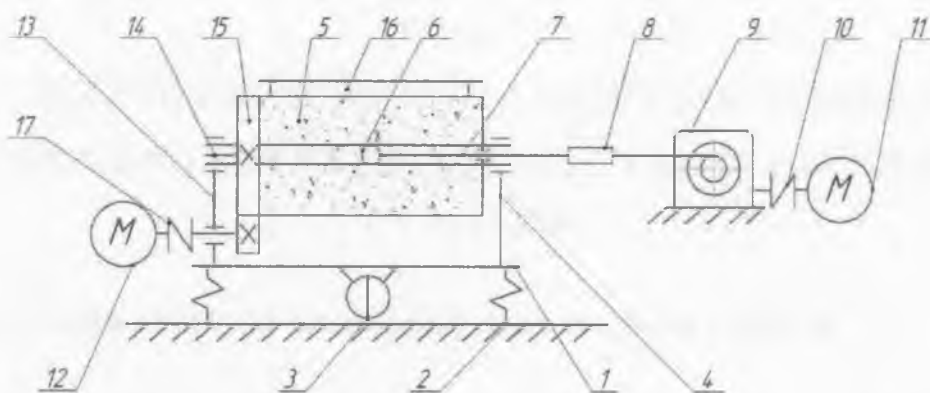
Рисунок 3.2 – Загальний вигляд вібраційної сушарки для фільтраційно-конвективного сушіння високовологого насіння

На другому етапі процесу після видалення поверхневої вологи відбувається конвективне сушіння попередньо підігрітого матеріалу в аеровіброкиплячому шарі шляхом продувки підігрітого сушильного агента через перфороване днище і матеріал, порозність якого внаслідок попередніх підготовчих операцій значно підвищується, а когезивно-адгезивні властивості знижуються. Це дає змогу збільшити температуру сушильного агента і тим самим значно інтенсифікувати тепломасообмінний процес при дотриманні кінцевих якісних показників продукції та суттєвому зниженню енергозатрат.

### 3.2 Експериментальне оснащення

З метою вивчення зміни в'язкості насіння під впливом вібрації використовувався віскозиметр, робота якого відбувається наступним чином: сипкий матеріал, що знаходиться в робочій камері 5, піддається впливу вібрації, яка створюється віброзбуджувачем 3; кулька 6 з проточками переміщується по струнах 7 всередині віброуючої камери долаючи опір сипкого середовища, який фіксується мікродатчиком навантаження 8 (рис. 3.3). Кулька 6 рухається з постійною швидкістю, яку забезпечує черв'ячний редуктор 9, який через муфту 10 приводиться в рух електродвигуном 11.

Зусилля на протягування кульки, що знімається датчиком, перетворюється в електричний сигнал, який подається на комп'ютер.



1 – опора; 2 – пружні елементи; 3 – віброзбудувач; 4, 13 – стійки;  
 5 – камера; 6 – кулька; 7 – струна; 8 – мікродатчик навантаження;  
 9 – черв'ячний редуктор; 10, 17 – муфти; 11, 12 – електродвигуни; 14 – вал; 15 –  
 відкрита зубчаста передача; 16 – люк

Рисунок 3.3 – Схема дослідного зразка віскозиметра

Вимірювання перепаду тисків в сушильній камері та тиску в магістралях подачі-відбору сушильного агента здійснювались за допомогою цифрового манометра серії DPGW виробництва Dwyer Instruments. Розрідження в піддоні сушильної камери вимірювалось цифровим вакуумметром с датчиком типу Пірані KVC KP 120.

Тривалість процесів, вимірювання швидкості обертання лопатевого вала здійснювались за допомогою секундоміра і тахометра UNI-T UT 372.

Споживана потужність та витрати електроенергії вимірювались електролічильником NIK 2303 APK1 1120 та трьохфазним ватметром змінного струму DMK 75.

Для вимірювання амплітудно-частотних характеристик вібраційної установки використовували вимірювальний комплекс «ROBOTRON». Це трьохканальний прилад з трьома інтегруючими підсилювачами і з аналоговою індикацією вимірюваних величин, яка може виводитись на осцилоскоп 02 050 для візуального аналізу коливних процесів.

Вібровимірювач 00 100 використовується разом із п'єзоелектричними чутливими елементами датчиків прискорення (п'єзоелектричні вібровимірювальні перетворювачі) типу KD 35 для вимірювання механічних коливань, а також одинарних чи повторюваних поштовхів.

## РОЗДІЛ 4

# РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЕКОНОМІЧНИЙ ЕФЕКТ ВІД ВИКОРИСТАННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ СУШАРКИ

### 4.1 Кінетика сушіння високовологого насіння гарбуза

Характер перебігу процесу сушіння найбільш повно описується кривими сушіння, тобто кривими, які характеризують зміну вологості матеріалу в часі. По кривим сушіння можна також визначити зміну швидкості сушіння в часі, тобто визначити зміну інтенсивності віддачі вологи матеріалом. По зміні швидкості сушіння можливо також визначити зміну інтенсивності негативних внутрішніх джерел теплоти.

При проведенні експериментів визначали вологість матеріалу, швидкість і температуру повітря. Вологість матеріалу визначали стандартним способом. Для визначення температури і швидкості повітря використовували термоанемометр АМ 831.

Досліди проводили при початковій вологості матеріалу 38 % (вологовміст  $U_u = 0,43$ ). Швидкість повітря була 0,4; 0,6; 0,8; 1,0 м/с, а його температура 40, 50 і 60 °С. Результати дослідів наведені на рис. 4.1-4.16.

На рис. 4.1, а наведено результати дослідження впливу на кінетику вібраційно-конвективного сушіння швидкості руху теплоносія (1 – 1 м/с; 2 – 0,8 м/с; 3 – 0,6 м/с; 4 – 0,4 м/с) за коефіцієнта заповнення робочої камери  $K_z = 0,75$ , віброприскорення  $A\omega^2 = 138 \text{ м/с}^2$  та температури теплоносія  $t_{ca} = 50^\circ\text{C}$ .

За швидкості руху теплоносія  $V_{ca} = 0,4 \text{ м/с}$  і перший і другий періоди сушіння тривають по 3000 с (загальна тривалість сушіння становить 6000 с), а за  $V_{ca} = 1 \text{ м/с}$  – другий період сушіння починається через 2000 с і триває 1600 с (загальна тривалість сушіння 3600 с). Отже, швидкість теплоносія також має значний вплив на тривалість першого і другого періодів сушіння.

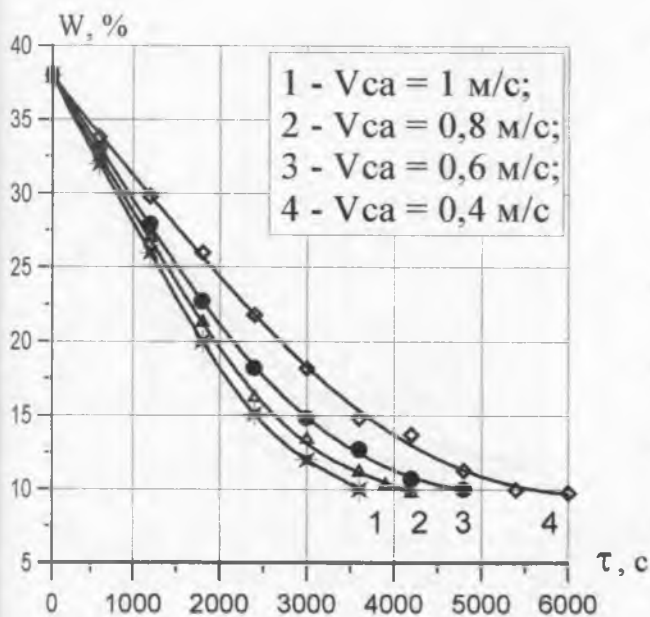


Рисунок 4.1, а – Зміна вологості насіння гарбуза від тривалості вібраційно-конвективного сушіння за різних значень швидкості сушильного агента за:  $t_{ca} = 50^{\circ}\text{C}$ ;  $K_3 = 0,75$ ;  $A\omega^2 = 138 \text{ м/с}^2$

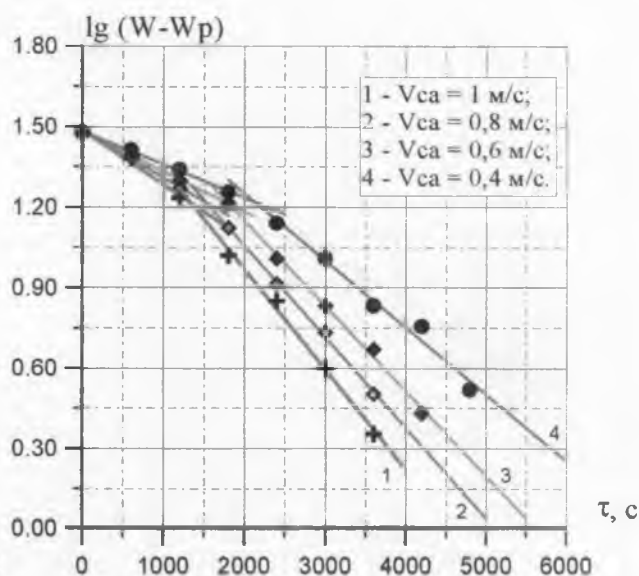


Рисунок 4.1, б – Визначення критичної вологості насіння гарбуза та часу її досягнення за вібраційно-конвективного сушіння за різних значень швидкості сушильного агента за:  $t_{ca} = 50^{\circ}\text{C}$ ;  $K_3 = 0,75$ ;  $A\omega^2 = 138 \text{ м/с}^2$

З метою обґрунтування доцільності вібраційної активації процесу було проведено дослідження інтенсифікуючої дії вібраційного впливу (амплітуди та частоти вібраційних коливань). Вплив амплітуди вібраційних коливань робочої камери на кінетику сушіння досліджували за коефіцієнта наповнення робочої камери 0,75, швидкості теплоносія 0,6 м/с та температури  $60^{\circ}\text{C}$  (рис. 4.2, а).

Амплітуду вібрацій змінювали в межах 12-18 мм. Результати дослідження (рис. 4.2, а) вказують на скорочення тривалості сушіння із збільшенням амплітуди вібрації: за  $A = 12$  мм час початку другого періоду сушіння зафіксовано через 3300 с, а тривалість сушіння загалом становить 7200 с; за  $A = 18$  мм другий період настає вже через 2200 с (що у 1,5 рази швидше) і триває 900 с, що у 4,3 рази швидше ніж за  $A = 12$  мм. Загальна тривалість сушіння скорочується майже у 2,3 рази і становить 3100 с.



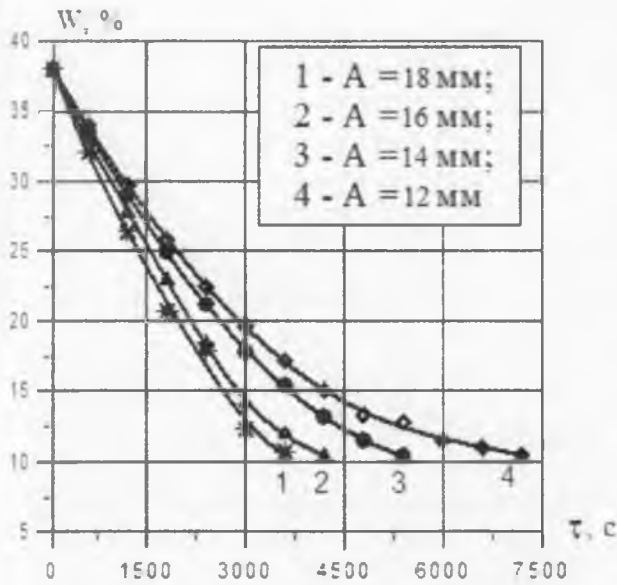


Рисунок 4.2, а – Зміна вологості насіння гарбуза від тривалості вібраційно-конвективного зневолення за різних значень амплітуди вібрацій робочої камери за:  $K_3 = 0,75$ ;  $V_{ca} = 0,6$  м/с;  $A\omega^2 = 138$  м/с<sup>2</sup>;  $t_{ca} = 50^\circ\text{C}$

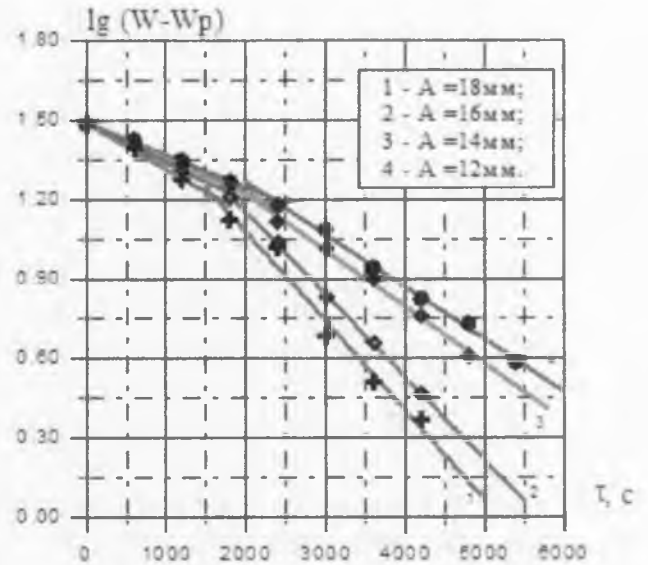


Рисунок 4.2, б – Визначення критичної вологості насіння гарбуза та часу її досягнення за вібраційно-конвективного сушіння за різних значень амплітуди вібрацій робочої камери за:  $K_3 = 0,75$ ;  $V_{ca} = 0,6$  м/с;  $A\omega^2 = 138$  м/с<sup>2</sup>;  $t_{ca} = 50^\circ\text{C}$

Результати досліджень впливу частоти вібраційних коливань (рис. 4.3, а) вказують на пряму залежність між частотою вібрації робочої камери та тривалістю сушіння: чим більша частота, тим більша інтенсивність вібраційно-конвективного сушіння. Як видно з рис. 4.3, а, за частоти вібрації  $f = 10$  Гц початок другого періоду починається через 3200 с і триває 2800 с, а загальна тривалість сушіння становить 6000 с. За частоти вібрації  $f = 25$  Гц другий період сушіння починається через 2000 с і триває 2200 с, а загальна тривалість сушіння становить 4200 с, що майже у 1,5 рази менше, ніж за  $f = 10$  Гц.

Результати дослідження впливу температури теплоносія в межах  $40-60^\circ\text{C}$  на кінетику вібраційно-конвективного сушіння насіння гарбуза за швидкості руху теплоносія  $0,6$  м/с, віброприскорення  $A\omega^2 = 138$  м/с<sup>2</sup> та коефіцієнта заповнення робочої камери  $0,75$  наведено на рис. 4.4, а.



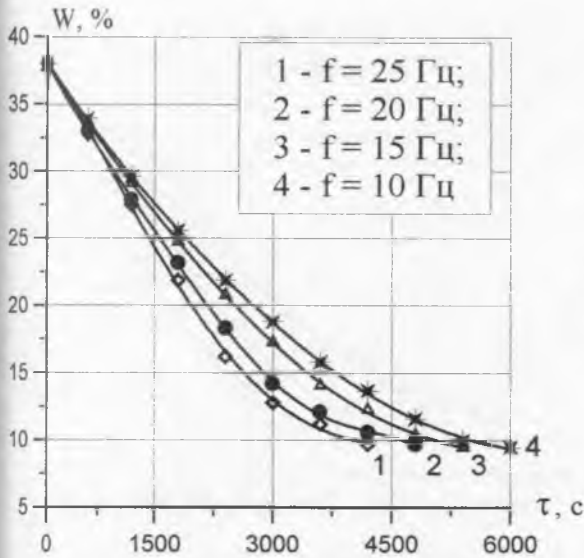


Рисунок 4.3, а – Зміна вологості насіння гарбуза від тривалості вібраційно-конвективного зневолення за змінних значень частоти вібрацій робочої камери за:  $K_3 = 0,75$ ;  $V_{ca} = 0,6$  м/с;  $t_{ca} = 50^\circ\text{C}$

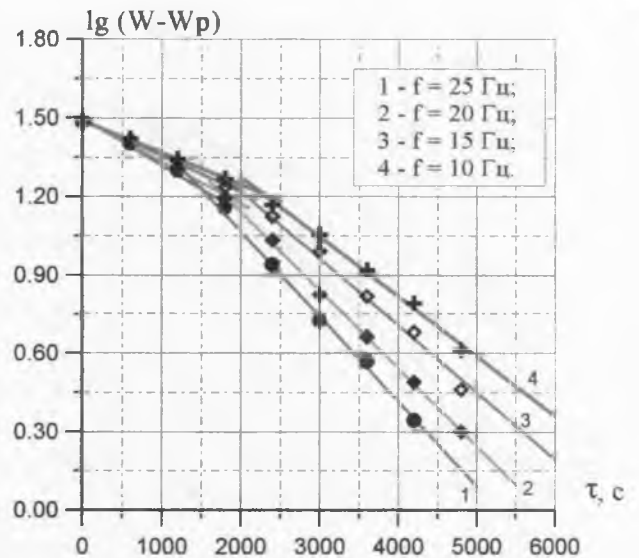


Рисунок 4.3, б – Визначення критичної вологості насіння гарбуза та часу її досягнення за вібраційно-конвективного сушіння за змінних значень частоти вібрацій робочої камери за:  $K_3 = 0,75$ ;  $V_{ca} = 0,6$  м/с;  $t_{ca} = 50^\circ\text{C}$

Отримані результати вказують на зростання інтенсивності процесу як у першому, так і другому періодах сушіння із збільшенням температури теплового агенту. Як видно з рис. 4.2, а, за температури  $40^\circ\text{C}$  другий період сушіння починається через 3600 с і триває майже 3000 с, загальна тривалість сушіння становить 6500 с.

За температури теплоносія  $60^\circ\text{C}$  другий період сушіння настає вже через 1800 с і триває протягом 1800 с, а загальна тривалість сушіння становить 3600 с, що в 1,8 разів менше, ніж за температури  $40^\circ\text{C}$ .

Отже, чим вищою є температура теплоносія, тим інтенсивніше відбувається процес сушіння.

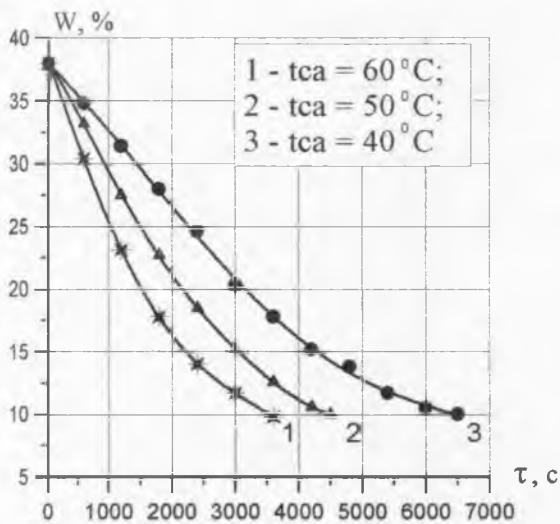


Рисунок 4.4, а – Зміна вологості насіння гарбуза від тривалості вібраційно-конвективного зневоложення за різних значень температури сушильного агента за:  $K_3 = 0,75$ ;

$$V_{ca} = 0,6 \text{ м/с}; A\omega^2 = 138 \text{ м/с}^2$$

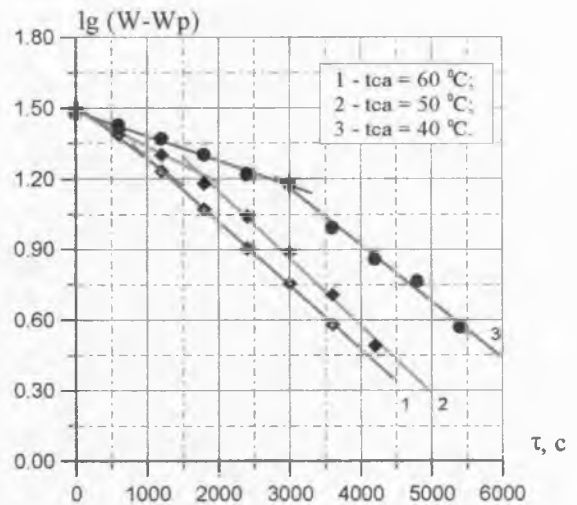


Рисунок 4.4, б – Визначення критичної вологості насіння гарбуза та часу її досягнення за вібраційно-конвективного сушіння за змінних значень температури сушильного агента за:  $K_3 = 0,75$ ;  $V_{ca} = 0,6 \text{ м/с}$ ;

$$A\omega^2 = 138 \text{ м/с}^2$$

Проте температура сушіння такого продукту, як насіння гарбуза обмежується певним граничним рівнем з метою не тільки зменшення його вологості, а й одночасного збереження його здатності до схожості та енергії проростання. У довідниковій літературі [17] визначено, що гранично допустима температура нагрівання насіння гарбуза становить  $t_{н \text{ max.допуст}} = 47^\circ\text{C}$  за відповідної тривалості процесу сушіння. Детально визначення раціональних параметрів процесу сушіння з урахуванням допустимих значень температури нагрівання насіння гарбуза висвітлені в роботі [18].

Усереднену температуру нагрівання поверхні насіння визначали методом вимірювання «у раптово опущеному шарі» [19], коли тимчасово припинялося подавання теплоносія та віброзбудження. Похибка такого способу вимірювання не перевищувала 0,5 %.

Під час досліджень кінетики вібраційно-конвективного сушіння також було встановлено динаміку зміни температури нагрівання поверхні насіння гарбуза (рис. 4.5).

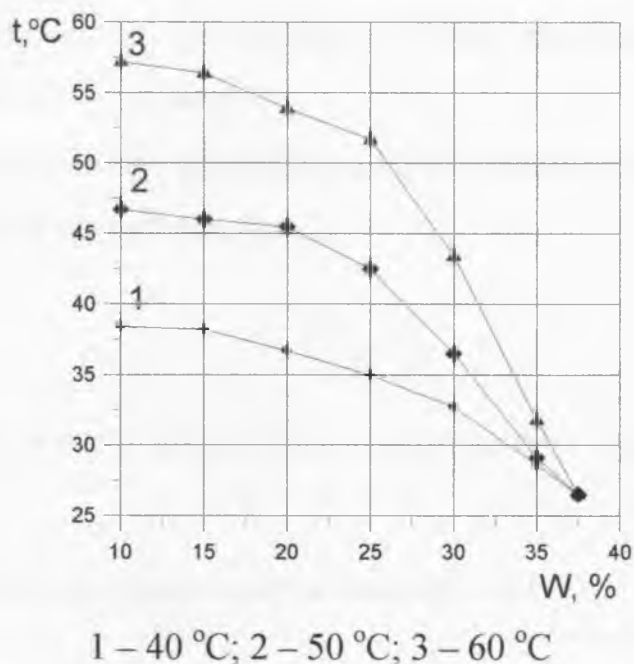


Рисунок 4.5 – Зміна вологості насіння гарбуза від тривалості вібраційно-конвективного сушіння за різних значень температури сушильного агента за умов:  $K_3 = 0,75$ ;  $V_{ca} = 0,6$  м/с;  $A\omega^2 = 138$  м/с<sup>2</sup>

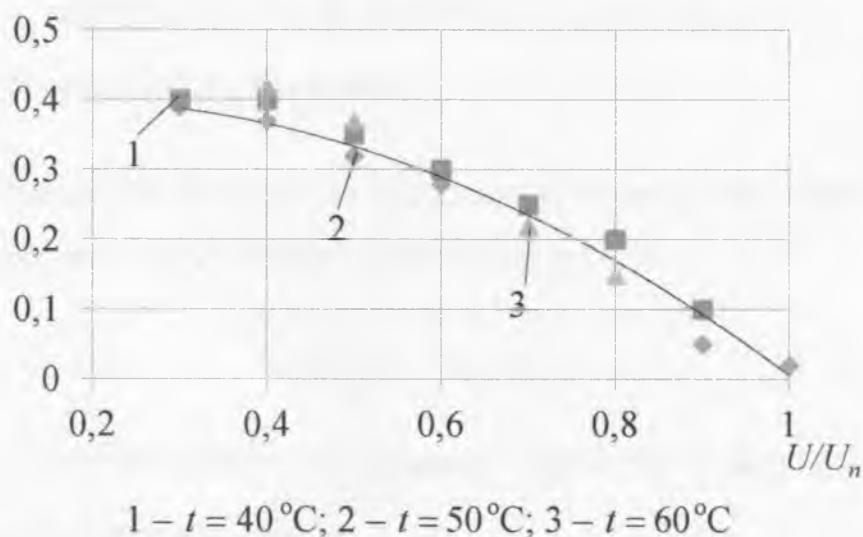


Рисунок 4.6 – Узагальнена крива сушіння насіння гарбуза при  $V = 0,4$  м/с

#### 4.2 Економічний ефект від використання розробленої сушарки

Розроблена модель вібраційної установки в першу чергу забезпечує високу якість процесу сушіння насіннєвого матеріалу. До переваг розробленої моделі можна віднести зменшення спожитих ресурсів на її обслуговування порівняно із існуючими зразками, що забезпечує можливість використання

даної моделі у невеликих за розміром господарствах, орієнтованих на вирощування насіннєвої продукції.

Річний обсяг наробітку розробленою вібраційною установкою в умовах конкретної природно-кліматичної зони:

$$B_3 = W_{ек} \cdot T_3, \quad (4.1)$$

де  $W_{ек}$  – продуктивність розробленої машини за 1 год. експлуатаційного часу, кг/год.;

$T_3$  – зональне річне завантаження машини, год.

Річний економічний ефект, отриманий за рахунок зміни кількості та якості продукції:

$$E_я = C_{ян} - C_{яб}, \quad (4.2)$$

де  $C_{ян}, C_{яб}$  – вартість продукції, отриманої у разі застосування розробленої та базової машини протягом року.

Річний економічний ефект від експлуатації розробленої вібраційної установки з урахуванням кількості та якості продукції:

$$E_p = (\Pi_б - \Pi_p) \cdot B_3 + E_я, \quad (4.3)$$

де  $\Pi_б, \Pi_p$  – сукупні витрати на одиницю наробітку відповідно по базовій і розробленій машинах, грн./кг;

$B_3$  – річний обсяг наробітку розробленою машиною в умовах конкретної природно-кліматичної зони, кг;

$E_я$  – річний економічний ефект одержаний за рахунок зміни кількості та якості продукції, грн.

Вартість продукції, одержаної у разі застосування розробленої чи базової

машин ( $C_x$ ):

$$C_x = \sum_{j=1}^n C_j \cdot V_j, \quad (4.4)$$

де  $C_j$  – закупівельна ціна одиниці  $j$ -ої продукції, грн.;

$V_j$  – кількість  $j$ -ої продукції, одержаної у разі застосування розробленої чи базової машини, кг.

Річний прибуток від експлуатації розробленої вібраційної установки:

$$O = (I_b - I_n) \cdot B_z + E_n, \quad (4.5)$$

де  $I_b, I_n$  – прямі експлуатаційні витрати відповідно по базовій та розробленій машинах на одиницю наробітку, грн./кг.

Лімітна ціна розробленої машини:

$$C_n = \left( \frac{E_p}{a_n + E_n} + B_n \right) \cdot \frac{1}{k_b} \cdot \delta, \quad (4.6)$$

де  $B_n$  – балансова вартість розробленої машини (без податку на додану вартість), грн.;

$a_n$  – коефіцієнт відрахувань на амортизацію розробленої машини;

$k_{\delta} = 1,1$  – коефіцієнт для машин та устаткування, які не потребують монтажних робіт чи додаткового складання безпосередньо на місці експлуатації;

$k_{\delta} = 1,2$  – коефіцієнт для машин та устаткування, які потребують монтажних робіт чи додаткового складання безпосередньо на місці експлуатації;

$\delta$  – коефіцієнт гарантії споживачу економічного ефекту від використання нової машини;

$E_n$  – коефіцієнт ефективності інвестиційних вкладень.

Отримані результати показників порівняльної економічної ефективності розробленої вібраційної установки заносимо в таблицю 4.1.

Назва сільськогосподарської операції	Марка	Кількість, шт.	Обслуговуючий персонал		Продуктивність, кг/год.	Витрати палива (електроенергії), кг (кВт. год./кг)	Затрати праці, люд.-год./кг	Балансова вартість машини, грн.	Прямі експлуатаційні витрати по елементах, грн./кг					Інвестиційні вкладення, грн./кг	Сукупні витрати грн./кг
			Професія, розряд	Кількість, люд.					Змінна	Експлуатаційна	Заробітна платня	Амортизація	Капітальний, поточний ремонт, технічне обслуговування		
<b>Розроблена вібраційна сушарка</b>															
	3	1	16,25	18,5	0,35	0,054	220100	3,217	1,303	1,487	1,586	8,897	9,153	10,728	
<b>Базова машина</b>															
	1	5	12,5	15	1,64	0,33	237600	6,97	1,828	1,98	6,343	19,334	12,185	21,771	

## ВИСНОВКИ

1. Зберігання насіння баштанних культур в сухому стані є необхідною умовою для підтримання його високої життєздатності в партіях посівного матеріалу. Існуюче зерносушильне обладнання не відповідає вимогам до сушіння високовологого насіння баштанних культур, тому існує потреба в розробці, дослідженні та впровадженні енергоефективних схем та конструкцій.

2. Обробка насінневого матеріалу може ефективно проводитися у вібраційних установках, оскільки вони забезпечують інтенсивні та енергоощадні режими обробки матеріалу з одночасною щадною дією на оброблюваний матеріал.

3. Встановлено основні характеристики процесу сушіння та тип обладнання для реалізації запропонованої концепції інтенсивного енергоощадного процесу сушіння високовологого насіння гарбуза, що стало підґрунтям розробки раціональної конструктивно-технологічної схеми вібраційної установки з U-подібною робочою камерою, яка реалізовує послідовно фільтраційний та конвективний способи сушіння.

4. Внаслідок виконаних експериментальних досліджень кінетики вібраційно-конвективного сушіння насіння гарбуза отримано підтвердження доцільності технологічних параметрів ведення процесу: максимально допустима температура сушильного агента складає  $t_{ca} = 52^{\circ}\text{C}$ , що відповідає максимально допустимій температурі нагрівання насіння  $t_{н2} = 46,7^{\circ}\text{C}$ , за якої насіння зберігає кондиційні значення схожості та енергії проростання. Значення максимально допустимої температури є на  $0,3^{\circ}\text{C}$  меншою, ніж гранично допустима температура нагрівання для насіння гарбуза.

5. Встановлено, що загальний річний економічний ефект від впровадження результатів досліджень у виробництво становить 412000 грн./рік на одну машину за терміну окупності капіталовкладень 0,5 року. У випадку сушіння товарного насіння сума річного ефекту становить 296733 грн./рік на одну машину за терміну окупності капіталовкладень 0,8 років.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ринок зерна врожаю 2018 року. Суми, 2018. URL: <http://www.propozitsiya.com/ua/rynok-zerna-vrozhayu-2016-roku> (дата звернення: 15.10.2018).
2. Міністерство аграрної політики та продовольства України. Київ, 2018. URL: <http://www.minagro.gov.ua> (дата звернення: 15.10.2018).
3. Врожай зернових-2018: встановлено історичний рекорд. Київ, 2018. URL: <http://www.landlord.ua/news/vrozhay-zernovih-2018-vstanovleno-istorichniy-rekord/> (дата звернення: 15.12.2018).
4. Гарбуз знову в моді. Київ, 2019. URL: <http://agro-business.com.ua/agro/podiia/item/11521-harbuз-znovu-v-modi.html> (дата звернення: 17.12.2019).
5. Гроші із гарбуза: інвестиції в виробництва гарбузового насіння окупляться за 4-5 місяців. Дніпро, 2017. URL: <http://chp.com.ua/ua/all-news/item/53226-groshi-iz-garbuza-investitsiji-v-virobnitstva-garbuзovogo-nasinnya-okuplyatsya-za-4-5-misyatsiv> (дата звернення: 15.12.2018).
6. ДСТУ 2240-93. Видання. Насіння сільськогосподарських культур сортові та посівні якості. Київ, 1993. 74 с.
7. Вобликов Е.М., Буханцова В.А., Маратов Б.К. та ін. Послеуборочная обработка и хранение зерна. Ростов-на-Дону, 2001. 240 с.
8. Зерносушилка ДСП-32. Москва, 2018. URL: <http://www.zernokorm.biz/zernosushilka-dsp-32> (дата звернення: 11.04.2018).
9. Анисимов И.Ф. Машины и поточные линии для производства семян овощеводческих культур. Кишинев, 1987. 300 с.
10. Трубилин Е.И., Федоренко Н.Ф., Тлишев А.И. Механизация послеуборочной обработки семне и зерна. Краснодар, 2009. 96 с.
11. Каховський експериментальний механічний завод. Каховка, 2019. URL: <http://kemz.com.ua/v-kb-153-sushilnaya-ustanovka-sushilnyj-stol-dlya-tykvennoj-semechki.html>. (дата звернення: 30.06.2018).



12. Поперечний А.М. Наукове обґрунтування впливу механічних коливань на інтенсифікацію процесів переробки харчової сировини: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.18.12. Харків, 2004. 47 с.

13. Конструкции сушилок. Москва, 2014. URL: <http://www.studopedia.info/1-114389.html> (дата звернення: 02.07.2018).

14. А. с. 566107. МКИ2 F 26 B 17/26. Вибрационная сушилка для дисперсных материалов / П.Д. Денисов, О.П. Калиновская. № 566107; заявл. 16.12.75; опубл. 25.07.77, Бюл. № 27.

15. Ковбаса В.П., Ярошенко В.В. Розподіл напружень у сипкому середовищі, обмеженому стінками споруди силосного типу. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. Кіровоград, 2010. Вип. 40, ч. 1. С. 314-324.

16. Ковбаса В.П., Швайко В.М., Гуцол О.П. Механіка сільськогосподарських матеріалів і середовищ. Київ-Ніжин, 2015. 536 с.

17. Ковбаса В.П. До визначення фізичних рівнянь пружно-в'язко-пластичного середовища з умовою руйнування за модифікованим критерієм Кулона-Мора. *Праці ТДАТУ*. Мелітополь, 2011. Вип. 11, т.2. С. 161-174.

18. Ковбаса В.П., Солоня О.В., Спирін А.В. та ін. Про спрощення критерію вигляду напружено-деформованого стану суцільного середовища. *Всеукраїнський науково-технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК»*. Вінниця, 2018. №1 (100). С. 44-49.

19. Цуркан О.В., Ковбаса В.П. Формализация колебательного движения сыпучей дискретной среды в колеблющейся емкости. *Інженерія та технології: наука, освіта, виробництво: Праці Міжнар. наук.-техн. конф. (Луцьк, 15-16 лист. 2018)*. Луцьк, 2018. С. 266-269.

20. Зенков Р.Л. Механика насыпных грузов. Москва, 1952. 217 с.