

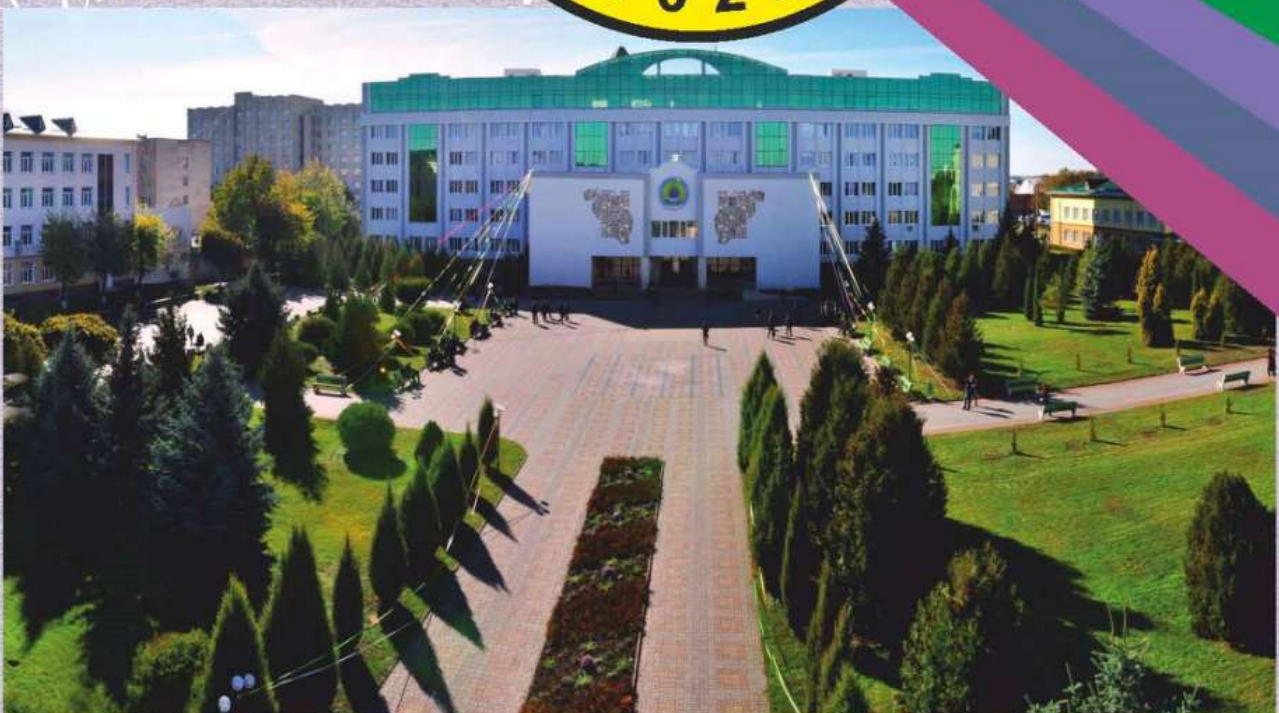
Всеукраїнський науково-технічний журнал

Ukrainian Scientific & Technical Journal

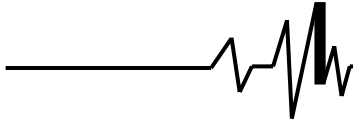
ISSN 2306-8744

DOI: 10.37128/2306-8744-2022-3

# Вібрації в техніці та технологіях





**ВІБРАЦІЇ В  
ТЕХНІЦІ ТА  
ТЕХНОЛОГІЯХ**

Журнал науково-виробничого та навчального  
спрямування Видавець: Вінницький національний  
аграрний університет

Заснований у 1994 році під назвою “Вібрації в техніці та  
технологіях”

*Свідоцтво про державну реєстрацію засобів масової  
інформації*

КВ № 16643-5115 ПР від 30.04.2010 р.

*Всеукраїнський науково-технічний журнал “Вібрації в техніці та  
технологіях” / Редколегія: Калетнік Г.М. (головний редактор) та інші. – Вінниця,  
2022. – 3 (106) – 87 с.*

*Друкується за рішенням Вченої ради Вінницького національного аграрного  
університету (протокол № 6 від 23.12.2022 р.)*

*Періодичне видання включено до Переліку наукових фахових видань  
України з технічних наук (Категорія «Б» Наказ Міністерства освіти і науки  
України від 02.07.2020 р. № 886)*

**Головний редактор**

**Калетнік Г.М.** – д.е.н., професор,  
академік НААН України, Вінницький  
національний аграрний університет

**Заступник головного  
редактора**

**Адамчук В.В.** – д.т.н., професор, академік  
НААН України, Національний науковий  
центр “Інститут механізації та електрифікації  
сільського господарства”

**Відповідальний секретар**

**Солона О.В.** – к.т.н., доцент, Вінницький  
національний аграрний університет

**Члени редакційної колегії**

**Булгаков В.М.** – д.т.н., професор, академік  
НААН України, Національний університет  
біоресурсів і природокористування України

**Граняк В.Ф.** – к.т.н., доцент, Вінницький  
національний аграрний університет

**Деревенько І. А.** – к.т.н., доцент,  
Національний університет «Львівська  
політехніка»

**Зіньковський А.П.** – д.т.н., професор,  
Інститут проблем міцності імені Г. С.  
Писаренка НАН України

**Купчук І.М.** – к.т.н., доцент, Вінницький  
національний аграрний університет

**Матвеев В.В.** – д.ф.-м.н., професор,  
академік НАН, Інститут проблем міцності  
імені Г.С. Писаренка НАН України

**Полєвода Ю.А.** – к.т.н., доцент, Вінницький  
національний аграрний університет

**Севостьянов І.В.** – д.т.н., професор,  
Вінницький національний аграрний  
університет

**Твердохліб І.В.** – к.т.н., доцент, Вінницький  
національний аграрний університет

**Токарчук О.А.** – к.т.н., доцент, Вінницький  
національний аграрний університет

**Цуркан О.В.** – д.т.н. доцент, Вінницький  
національний аграрний університет

**Зарубіжні члени редакційної колегії**

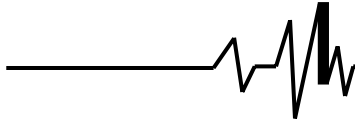
**Максімов Джордан Тодоров** – д.т.н., проф., Технічний Університет Габрово (Болгарія)

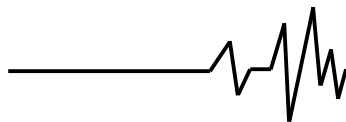
Технічний редактор **Мельничук С.В.**

Адреса редакції: 21008, Вінниця, вул. Сонячна 3, Вінницький національний аграрний  
університет, тел. 46 – 00– 03

Сайт журналу: <http://vibrojournal.vsau.org/>

Електронна адреса: [vibration.vin@ukr.net](mailto:vibration.vin@ukr.net)

**З М І С Т****1. ТЕОРІЯ ПРОЦЕСІВ ТА МАШИН***Калетнік Г.М., Яропуд В.М.***РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ У ВЕНТИЛЯЦІЙНІЙ СИСТЕМІ ТВАРИНИЦЬКИХ ПРИМІЩЕНЬ .....5***Севостьянов І.В.***РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ВІБРОСУШАРКИ ДЛЯ ПЕРЕРОБЛЕННЯ ВОЛОГИХ ДИСПЕРНИХ ВІДХОДІВ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ .....13***Котов Б.І., Степаненко С.П., Грушецький С.М., Грищенко В.О.***МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СЕПАРАЦІЇ ЗЕРНА ЗА ГУСТИНОЮ В КОМБІНОВАНОМУ ВІБРОПНЕВМАТИЧНОМУ ТА ПОВІТРЯНО-ГРАВІТАЦІЙНОМУ АГРЕГАТІ .....22***Коруняк П.С., Шеремета Р.Б., Швець О.П., Березовецький С.А.***ВЕРТИКАЛЬНИЙ ВІБРАЦІЙНИЙ ПЕРЕСУВНИЙ ПРИСТРІЙ .....29***Швець О.П., Коруняк П.С., Баранович С.М., Березовецький С.А.***ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ВІБРАЦІЙНОГО СЕПАРАТОРА .....36***Остапенко Ж.І.***МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЕКСТРАГУВАННЯ В АКУСТИЧНОМУ ЕКСТРАКТІ .....44****2. МАШИНОБУДУВАННЯ ТА МАТЕРІАЛООБРОБКА***Веселовська Н.Р., Богатюк.***ВПЛИВ ЛЕГУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НЕЩОДАВНО ВИГОТОВЛЕНИХ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ АL, ОТРИМАНИХ ТРАДИЦІЙНИМ ПРОЦЕСОМ ЛИТТЯ .....49***Шаргородський С.А., Руткевич В.С., Ящук Є.О.***МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОПРИВОДА ПЕРЕВЕДЕННЯ ШИРОКОЗАХВАТНОГО СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО АГРЕГАТУ ІЗ ТРАНСПОРТНОГО ПОЛОЖЕННЯ У РОБОЧЕ .....54***Гайдамак О.Л., Кучеренко Ю.С.***ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МОДЕРНІЗАЦІЯ ГАЗОДИНАМІЧНОГО НАПИЛЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ПОЛІМЕРНИХ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОКРИТТІВ ....64***Солоня О.В., Мельник О.С., Грищенко В.О.***МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ МІНЕРАЛЬНОГО ЖИВЛЕННЯ РОСЛИН В ЗАКРИТОМУ ҐРУНТІ .....72****3. ПЕРЕРОБНІ ТА ХАРЧОВІ ВИРОБНИЦТВА***Солоня О.В., Замрій М.А.***ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШАРКИ НАСІННИКІВ ТРАВ .....78**

**Севостьянов І. В.**

д.т.н., професор

**Вінницький  
національний аграрний  
університет****Sevostianov I.**Doctor of Technical Sciences,  
Professor**Vinnitsia National  
Agrarian University****УДК 66.011****DOI: 10.37128/2306-8744-2022-3-2****РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ  
ВІБРОСУШАРКИ ДЛЯ  
ПЕРЕРОБЛЕННЯ ВОЛОГИХ  
ДИСПЕРСНИХ ВІДХОДІВ  
ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ**

Однією з найбільш актуальних проблем підприємств харчової промисловості України (зокрема цукрової, спиртової, пивоварної, кавової), а також підприємств з виробництва фруктових та ягідних соків, є перероблення вологих дисперсних відходів, що мають початкову вологістю 90 – 95%. Як показала практика, дані відходи після зневоднення до вологості 20 – 25% можуть ефективно використовуватись як цінні добавки до сільськогосподарських кормів або в якості палива. При цьому вказану кінцеву вологість може забезпечити послідовна реалізація механічних способів зневоднення оброблюваного матеріалу на віброударному ситі, у шнековому пресі та віброударне навантаження у закритій прес-формі, що дозволяє суттєво знизити енерговитрати в порівнянні із термічним зневодненням. Але для більш тривалого зберігання вказаних відходів необхідна вологість не вища 8%, яка може бути досягнута тільки після їх додаткової теплової обробки. У статті пропонується схема комбінованої сушарки в якій перероблювані відходи послідовно проходять через стадії механічного зневоднення у шнекових живильниках, подрібнення у молотковій дробарці, обробку на віброситах з просторовим динамічним навантаженням та прикінцеве теплове зневоднення в псевдозрідженому стані у струменях гарячого повітря або пари, що є вторинними продуктами даного підприємства. При цьому у пропонованій сушарці передбачений замкнений робочий процес, що дозволяє за потребою проводити зневоднення однієї і тої самої порції відходів декілька разів до досягнення оптимальної кінцевої вологості. У статті також представлені рівняння та залежності для визначення тривалості зневоднення відходів на кожній стадії робочого процесу сушарки, її продуктивності за зневодненими відходами та сумарної потужності електродвигунів пропонованого обладнання. Все це дозволяє оцінити ефективність розглядуваної сушарки в порівнянні з іншими машинами аналогічного призначення.

**Ключові слова:** вібраційна сушарка, подрібнення, псевдозріджений шар, відходи харчових виробництв, продуктивність, потужність.

**Актуальність проблеми.** Однією з найбільш актуальних проблем підприємств харчової промисловості України (зокрема цукрової, спиртової, пивоварної, кавової), а також підприємств з виробництва фруктових та ягідних соків, є перероблення вологих дисперсних відходів, що мають початкову вологістю 90 – 95%. Як показала практика, дані

відходи після зневоднення до вологості 20 – 25% можуть ефективно використовуватись як цінні добавки до сільськогосподарських кормів або в якості палива [1]. При цьому вказану кінцеву вологість може забезпечити послідовна реалізація механічних способів зневоднення оброблюваного матеріалу на віброударному ситі, у шнековому пресі та віброударне навантаження у закритій прес-формі, що дозволяє суттєво знизити енерговитрати в порівнянні із термічним зневодненням [2]. Але для більш тривалого зберігання вказаних відходів необхідна вологість не вища 8%, яка може бути досягнута тільки після їх додаткової теплової обробки.

У зв'язку з цим, є доцільним проведення аналізу відомих пристроїв для механічного зневоднення вологих дисперсних матеріалів та їх термічної обробки з метою виявлення їх переваг та недоліків та створення на основі даних пристроїв удосконаленого обладнання для комбінованого видалення рідини з відходів харчових виробництв з метою їх ефективної переробки.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** У роботі [3] наведено схеми основних видів обладнання для сушіння вологих дисперсних матеріалів.

Барабанні сушарки, незважаючи на їх просту конструкцію, відрізняються досить великою матеріаломісткістю та енергоємністю, використовуються, як правило, у складі великих сушильних комплексів (рис. 1) і не забезпечують рівномірного сушіння всього обсягу оброблюваного матеріалу.

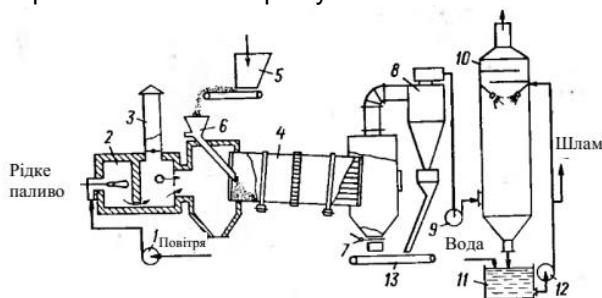


Рис. 1. Установка з барабанною сушаркою: 1 – вентилятор; 2 – топка; 3 – розтопна труба; 4 – барабанна сушарка; 5 – стрічковий живильник; 6 – завантажувальний лоток; 7 – затвор; 8 – циклон; 9 – димосос; 10 – скруббер; 11 – шламовідстійник; 12 – насос; 13 – стрічковий транспортер

Стрічкові сушарки (рис. 2), особливо з декількома виконавчими елементами є складнішими і вимагають створення особливого режиму кожної робочої зони. Для підвищення

рівномірності сушіння матеріалу їх оснащують перегрівачами. Основні параметри ефективності даного обладнання [3]: продуктивність за видаленою з матеріалу рідини – 10 – 50 кг/(м<sup>2</sup> · год); витрати тепла на 1 кг випареної рідини – 6 – 7 МДж (1666,7 – 1944,4 кВт · год/т); витрати повітря на 1 кг випареної рідини – 20 – 30 кг.

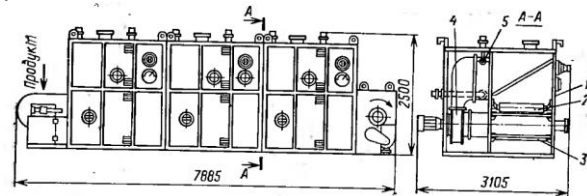


Рис. 2. Однострічкова сушарка типу СЛ-1200-3: 1 – корпус; 2 – стрічка; 3 – ролик, що розрівнює; 4 – циркуляційний вентилятор; 5 – калорифер

Розпилювальні сушарки (рис. 3) забезпечують високу продуктивність робочого процесу, але мають дуже значну енергоємність. Апарати даного обладнання, що забезпечують розпилення (механічні або пневматичні форсунки, відцентрові розпилювальні диски) можуть забиватися частинками матеріалу, що переробляється і це змушує зупинити процес сушіння і здійснювати їх періодичне чищення. Недоліком є також абразивний знос розпилювальних апаратів.

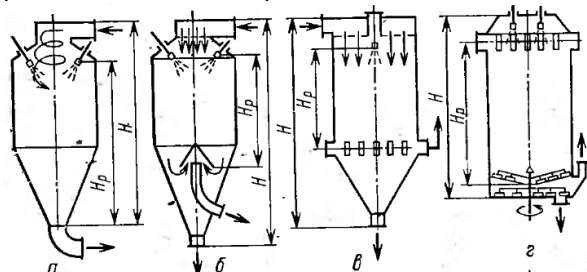
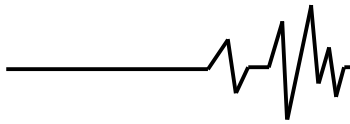


Рис. 3. Типи розпилювальних сушильних камер: а – із центральним закрученим підведенням теплоносія (прямоточна); б – з центральним підведенням теплоносія та роздільним відведенням газів та продуктів; в – з рівномірним розподілом газів по перерізу через розподільні ґрати; г – з радіальним (по периферії) підведенням теплоносія та центральним відсмоктувачем

У односекційних сушарок з псевдозрідженим шаром, незважаючи на компактність робочої зони, досить великі загальні габарити, тоді як багатосекційні сушарки даного типу при порівняно невеликій матеріаломісткості відрізняються помітно більшою конструктивною складністю [3]. Висока



ефективність даного обладнання обумовлена тим, що при його функціонуванні частинки продукту в робочій зоні сушарки знаходяться у зваженому стані, постійно переміщуються і змінюють розташування, що сприяє більш продуктивному та менш енергоємному видаленню каналів, утворених між твердими частинками рідини. Крім основного корпусу з псевдозрідженим шаром (див. рис. 4) сушарка включає [3]: апарати для підготовки теплоносія, очищення останнього від найдрібніших частинок продукту, що переробляється (циклони) і поділу теплоносія на рідку і повітряну фази.

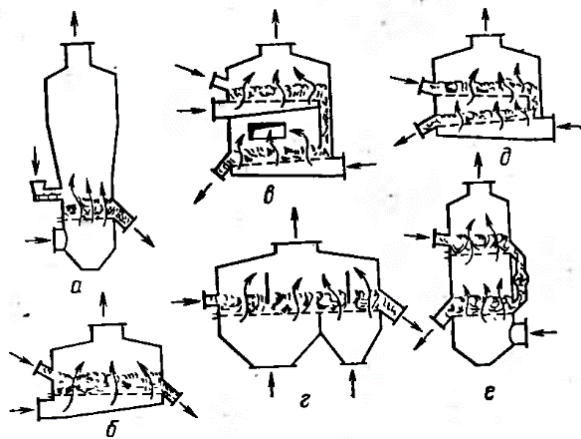


Рис. 4. Типи сушарок із псевдозрідженим шаром: **а** – однокамерна з неспрямованим рухом матеріалу; **б** – сушарка зі спрямованим рухом матеріалу; **в, г** – багатосекційні сушарки; **д** – сушарка прямокутного перерізу зі спрямованим рухом матеріалу; **е** – циліндрична сушарка

Як зазначається в роботі [3], вібраційні сушарки забезпечують суттєву інтенсифікацію робочого процесу, оскільки в них реалізується контактне та конвективне підведення тепла, що сприяє кращому видаленню вологи у тому числі з колоїдних матеріалів, до яких належать зазначені вище відходи харчових виробництв. Під час роботи вібраційних сушарок в середовищі оброблюваного матеріалу створюється псевдозріджений або віброкиплячий шар [4]. Однак запропоновані раніше конструкції обладнання даного типу засновані на безперервному одноразовому проходженні матеріалу, що переробляється через робочу зону, таким чином, для забезпечення заданих показників його кінцевої вологості, необхідне інтенсивне підведення тепла, що збільшує енергоємність обладнання.

Пневматичні сушарки мають досить високі економічні та експлуатаційні показники [3], але в більшості випадків є обладнанням вузькоспеціалізованого призначення і тому

вимагають відповідної підготовки матеріалу, що переробляється. Одноступінчасті та двоступінчасті (рис. 5) пневматичні установки з трубами-сушарками є складними та дорогими багатокорпусними технологічними комплексами та мають досить низький коефіцієнт використання займаного простору.

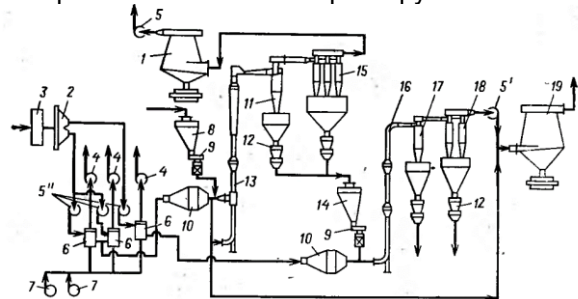


Рис. 5. Сушильна установка з двоступінчастою трубо-сушаркою ТС-2-600: **1** – апарат мокрого очищення; **2** – масляний фільтр; **3** – парові калорифери; **4** – димосос; **5** – вентилятор; **6** – підігрівач повітря; **8** – бункер; **9** – тарілчастий живильник; **10** – топка; **11, 15, 17, 18, 19** – циклони; **12** – пилові затвори; **13** – труба-сушарка першого ступеню; **14** – бункер другого ступеню; **16** – труба-сушарка першого ступеню;

Більш досконаліми слід вважати сушарки зі спіральними каналами для проходження суміші матеріалу, що переробляється і теплоносія (рис. 6) [3]. Однак використання даного обладнання є доцільним тільки для сушіння дрібнодисперсних заздалегідь зневоднених і добре диспергованих матеріалів, оскільки в іншому випадку велика ймовірність швидкого засмічення робочого каналу, очищення якого є досить трудомістким.

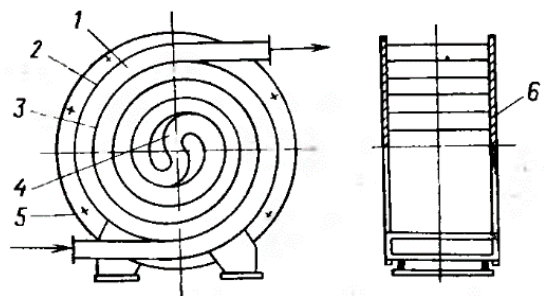
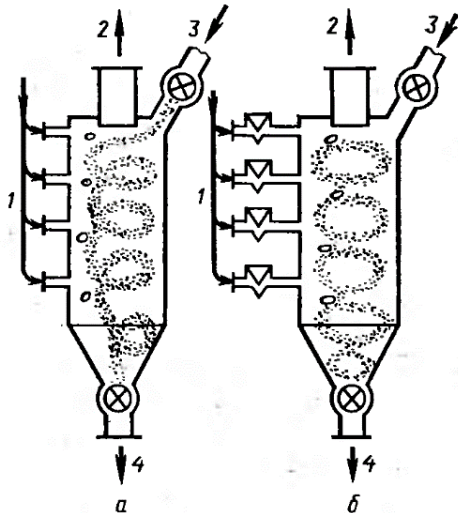


Рис. 6. Сушарка зі спіральним каналом у вигляді плоскої подвійної спіралі: **1** – спіральний канал; **2, 3** – спіральні стрічки; **4** – S-подібний перехід; **5** – стінка; **6** – кришка

Циклонні сушарки (рис. 7) [3] вимагають складної системи підведення теплоносія, а також ретельного попереднього зневоднення та подрібнення матеріалу, що переробляється.



Комбіновані сушарки [3] поєднують у собі пристрої двох і більше типів з тих, що були розглянуті вище та, відповідно, є найбільшими за габаритами, мають досить складну конструкцію та високу вартість.



**Рис. 7. Циклонні сушарки з регульованим часом перебування матеріалу: 1 – підведення теплоносія; 2 – вихід відпрацьованого теплоносія; 3 – завантаження вологого матеріалу; 4 – вивантаження висушеного матеріалу**

Загальною особливістю всіх наведених вище відомих сушарок є одноразове проходження матеріалу, що переробляється через робочу зону обладнання, що змушує для досягнення заданої кінцевої вологості останнього забезпечувати досить інтенсивне підведення теплоносія, виробленого спеціально для реалізації аналізованого процесу, що призводить до значних витрат енергії та коштів. Крім того, на нашу думку, найбільш ефективними є сушарки, що забезпечують псевдозріджений або віброкиплячий шар матеріалу, що переробляється, і разом з цим високопродуктивне виділення вологи по всьому його обсягу. Доцільним є також перемішування, подрібнення та розпушування матеріалу в процесі сушіння, наприклад, за допомогою шнекових живильників, молоткових дробарок [5], ентолейторів або детешерів [6], а також у вібробункерах [4], що сприяє кращому проникненню між твердими частинками теплого повітря та більш інтенсивному винесення вологи.

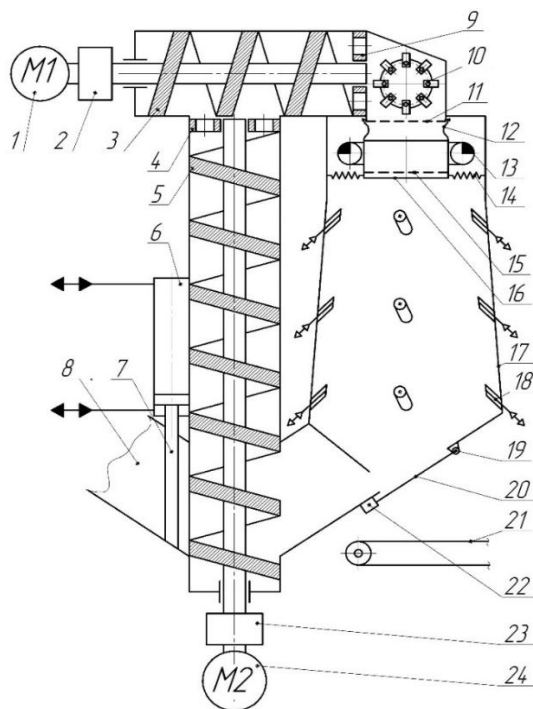
#### **Формулювання мети дослідження.**

Метою роботи є дослідження удосконаленої вібросушарки вологих дисперсних відходів харчових виробництв, розробленої з врахуванням виявлених під час проведеного

аналізу переваг та недоліків відомого обладнання для сушіння, а також представлених вище вимог. В задачі дослідження входить також отримання залежностей для визначення основних експлуатаційних параметрів пропонованої сушарки, за допомогою яких можна обґрунтувати її ефективність у порівнянні з іншим обладнанням аналогічного призначення.

**Результати дослідження.** Нижче на рис. 8 представлена розроблена нами з урахуванням вищенаведених висновків схема сушарки, яка спеціально призначена для переробки відходів харчових виробництв. Перероблюваний матеріал подається порціями з окремого бункера або безпосередньо з основного виробництва по похилій трубі 8 і при відкритій заслінці 7 завантажується у циліндр вертикального шнекового живильника 5 (після завершення завантаження порції заслінка 7 за допомогою гідроциліндра 6 опускається, перекриваючи подачу відходів з труби 8). Шнек 5 живильника, який за допомогою електродвигуна 24 та редуктора 23 приводиться в безперервний обертальний рух, подає далі відходи через насадку 4 для їх попереднього подрібнення у циліндр шнекового горизонтального живильника (привод шнека живильника складається з електродвигуна 1 та редуктора 2). Шнек 3 горизонтального живильника захоплює відходи стискає їх та подає через насадку 9 з дрібними отворами, що забезпечує більш ретельне подрібнення відходів. У стінках циліндрів живильників 5, 3 виконана велика кількість наскрізних радіальних отворів, закритих з середини металевою фільтрувальною сіткою для відведення видаленої рідини. У подальшому оброблюваний матеріал проходить через камеру молоткової дробарки [5] з обертовим ротором і виконавчими елементами 5, які здійснюють розбивання елементами у живильниках відходів, остаточне подрібнення їх частинок та розподілення частинок рівномірним шаром по поверхні сита 11. На виході з сита 11 частинки потрапляють через гумовотканинний рукав 12 у робочу камеру 16 вібраційного сита 15. Останнє приводиться у складнопросторовий коливальний рух за допомогою чотирьох дебалансних віброзбуджувачів 13 та чотирьох пружин 14, на яких підвішена робоча камера 16. Частинки матеріалу у камері 16 за відповідної частоти та амплітуди коливань [2] приводяться в стан псевдозрідження або віброкипіння, що сприяє ефективному видаленню з них вологи. На виході з камери 16 відходи потрапляють в основний корпус 17, де піддаються тепловому впливу з боку струменів гарячого повітря або

пари з сопел 18, розташованих в декількох перерізах по висоті корпусу 17 та рівномірно через рівні кути по периферії його внутрішніх стінок. При цьому повітря або пара для сушарки є вторинним продуктом основного виробництва, що дозволяє мінімізувати загальні витрати енергії на реалізацію робочих процесів у сушарці. Струмені повітря або пари гальмують рух частинок відходів та обтікають їх зі всіх сторін, що сприяє ефективному видаленню рідини. Висушена порція оброблюваного матеріалу збирається в нижній частині корпусу 17. У випадку, якщо її вологість задовольняє вимогам за командою з пульта автоматизованого керування відкривається електромагнітний замок 22 і порція зневоднених відходів розвантажується через кришку 20 на стрічковий конвеєр 21. Після розвантаження кришка автоматично закривається і подається команда на відкриття заслінки 7 та зневоднення наступної порції оброблюваного матеріалу.



**Рис. 8.** Схема сушарки для переробки відходів харчових виробництв: 1, 24 – електродвигуни; 2, 23 – редуктори; 3 – шнековий живильник; 4 – насадка; 5 – циліндр шнекового живильника; 6 – гідроциліндр; 7 – заслінка; 8 – похила труба; 9 – насадка; 10 – молоткова дробарка; 11 – грубе сито; 12 – гумовотканинний рукав; 13 – вібробуджувач; 14 – пружина; 15 – дрібне сито; 16 – корпус вібробункера; 17 – корпус сушарки; 18 – сопло; 19 – шарнір; 20 – кришка; 21 – стрічковий конвеєр; 22 – електромагнітний замок

Якщо ж вологість висушеної порції все ще висока вона скочає по кришці 20 до циліндра шнекового живильника 5 і направляєтся на повторне зневоднення через живильники, дробарку, вібросито та корпус 17.

Завдяки можливості багаторазового пропускання відходів через корпус 17 до досягнення їх заданої вологості, в якості теплоносія можна використовувати навіть тепле повітря, що отримується в спіральних трубках, улаштованих навколо гарячих колон і основних резервуарів виробництва. Таким чином, основна складова енергетичних витрат у процесах сушіння при використанні пропонованої сушарки буде майже повністю скорочена, що забезпечить суттєве підвищення загальної ефективності процесу утилізації. З цією ж метою доцільно змонтувати спіральні трубки з циркулюючим по них нагрітим повітрям навколо циліндрів живильників 5 і 3 камери дробарки 10 і вібробункера 16. Тривалість проходження порції відходів через корпуси сушарки (рис. 8) можна визначити за формулою

$$T_{\Sigma} = T_{e,n} + T_{z,n} + T_{\partial} + T_{e} + T_{n} + T_{c}, \quad (1)$$

де  $T_{e,n}$ ,  $T_{z,n}$ ,  $T_{\partial}$ ,  $T_{e}$ ,  $T_{n}$ ,  $T_{c}$  – відповідно тривалості переміщення частинки продукту в циліндрі вертикального 5 і горизонтального 3 живильників, камері дробарки 10, вібробункері 16, падіння в корпусі 17 та ковзання по його дню.

Перші три складові у формулі (1) можна знайти як

$$T_{e,n} = \frac{L_{e,n}}{n_{e,n} \cdot t_{e,n}}; \quad T_{z,n} = \frac{L_{z,n}}{n_{z,n} \cdot t_{z,n}};$$

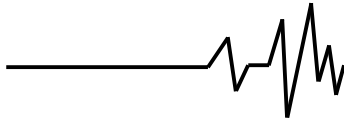
$$T_{\partial} = \frac{L_{c,\partial}}{4 \cdot v_{c,\partial}} = \frac{3\pi \cdot d_{c,\partial}}{4\pi \cdot d_{c,\partial} \cdot n_{\partial}} = \frac{3}{4n_{\partial}}, \quad (2)$$

де  $L_{e,n}$ ,  $L_{z,n}$ ,  $L_{c,\partial}$  – довжина переміщення частинки відходів у циліндрі живильника 5 (від осі труби 8 до виходу з насадки 4), циліндрі живильника 3 (від осі шнека 5 до виходу з насадки 9);  $n_{e,n}$ ,  $n_{z,n}$ ,  $n_{\partial}$  – частоти обертання шнеків живильників 5 і 3, а також ротора дробарки 10;  $t_{e,n}$ ,  $t_{z,n}$  – крок шнеків 5 і 3;  $v_{c,\partial}$  – окружна швидкість обертання середньої точки молотка дробарки 10;  $d_{c,\partial}$  – середній діаметр молотка.

Вважаємо, що вдаряючись об сито 11, частка відходів практично повністю втрачає свою кінетичну енергію і починає рух від сита вниз зі швидкістю  $v_{c0} = 0$ .

Змоделювати переміщення частинки по рукаву 12 через камеру вібробункера 13 до сита 15 досить складно, враховуючи просторовий характер коливань камери. Для спрощення аналізу руху частинки на даному етапі вважаємо, що вона переміщається в щільному





контакті з іншими частинками порції відходів. Тому допускаємо, що і частинки, прилеглі до стінок камери і переміщуються поблизу її вертикальної осі, повторюють рухи стінок камери в горизонтальній площині і одночасно здійснюють вільне падіння під дією власної сили тяжіння у вертикальному напрямку. Таким чином, результуюча траєкторія руху частинки відходів між ситами 11 і 15 являє собою гвинтову лінію діаметром  $d$ , відповідним амплітуді коливань камери  $A_k$ .

Тоді  $T_e$  можна розрахувати як

$$T_e = \sqrt{\frac{2 \cdot h_e}{g}}, \quad (3)$$

де  $h_e$  - висота камери вібробункера.

Складову  $T_n$  визначаємо за формулою [7]

$$\begin{aligned} T_n &= \sqrt{\frac{2h_k}{a_{ч.н}}} = \sqrt{\frac{2h_k}{(m_ч g - P_c)/m_ч}} = \\ &= \sqrt{\frac{2h_k}{g - P_c \frac{\pi d_ч^2}{4 m_ч}}} = \sqrt{\frac{2h_k}{g - \rho_e \frac{v_e^2 \pi d_ч^2}{2 \cdot 4 m_ч}}} = \\ &= \sqrt{\frac{2h_k}{g - \rho_e \frac{3 v_e^2}{4 d_ч \rho_o}}}, \end{aligned} \quad (4)$$

де  $h_k$  - переміщення частинки в корпусі 17 від сита 15 до осі кришки 20;  $a_{ч.н}$  – прискорення частки за її падіння;  $m_ч$  – маса середньої за розмірами частинки діаметром  $d_ч$ ;  $P_c$  – зусилля, створюване швидкісним напором [8] повітря, що подається через сопла 18;  $v$  - середня швидкість повітряного потоку в середньому поперечному перерізі корпусу 17 діаметром  $D_{cp}$ ;  $\rho_e$  - густина підігрітого повітря, що подається в корпус 17;  $\rho_o$  – густина відходів, яка залежить від їхньої поточної вологості  $U_m$  і визначається за формулою

$$\rho_o = \rho_m(1 - U_m) + \rho_{ж} U_m, \quad (5)$$

в якій  $\rho_m$  – густина твердої фази після їх повного висушування;  $\rho_{ж}$  – густина повністю очищеної від твердих частинок рідкої фази (відповідає густині прісної води [2]).

Оскільки отримати точну формалізовану залежність визначення зміни у часі  $U_m$  досить складно, т.к. остання залежить від виду і температури зневоднених відходів, температури повітря, що подається через сопла 18 та інших факторів, приймаємо припущення про те, що при одноразовому падінні частинки відходів у корпусі 17 її вологість –  $U_m$  змінюється від початкової  $U_n$  до кінцевої  $U_k$  відповідно до лінійного закону і тому може бути знайдена за формулою

$$U_m = U_n - \frac{U_n - U_k}{h_e} h. \quad (6)$$

Значення  $U_n$  і  $U_k$  для підстановки їх у формулу (6) необхідно визначити дослідним шляхом на експериментальному зразку сушарки (див. рис. 8) для кожного циклу проходження через неї відходів.

Для обчислення  $T_c$  складемо рівняння руху частинки відходів масою  $m_ч$  відносно днища корпусу 17 довжиною  $l_d$  і кришки 20 довжиною  $l_k$

$$m_ч a_{ч.с} = m_ч g \cdot \sin \alpha - m_ч g \cdot f \cdot \cos \alpha, \quad (7)$$

де  $a_{ч.с}$  - прискорення частки при її ковзанні;  $\alpha$  – кут нахилу днища корпусу 17 та кришки 20;  $f$  – коефіцієнт тертя між часткою відходів та днищем корпусу 17.

З формули (7) отримаємо

$$a_{ч.с} = g(\sin \alpha - f \cos \alpha). \quad (8)$$

Тривалість  $T_c$  знаходимо з рівняння

$$T_c = \sqrt{2 \frac{l_d + l_k}{a_{ч.с}}}. \quad (9)$$

Підставляючи формулу (8) у формулу (9) отримаємо

$$T_c = \sqrt{\frac{l_d + l_k}{g(\sin \alpha - f \cos \alpha)}}. \quad (10)$$

Продуктивність пропонованої сушарки  $Q_c$  за відходами, що висушуються від початкової вологості  $U_n = 25\%$  до кінцевої вологості  $U_k = 8\%$ , можна визначити як

$$Q_c = \frac{m_n}{T_\Sigma n_ч}, \quad (11)$$

де  $m_n$  - маса порції відходів, що висушуються;  $n_ч$  – кількість циклів проходження порції через сушарку задля досягнення вологості  $U_k$ .

Масу  $m_n$  знаходимо, виходячи з продуктивності шнекового живильника 5 [9]

$$Q_{e.n} = 47 D_{e.n}^2 t_{e.n} n_{e.n} f \cdot \rho_o C, \quad (12)$$

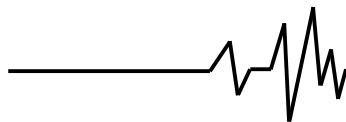
де  $D_{e.n}$  – діаметр шнека 5;  $C$  - поправочний коефіцієнт, що залежить від кута нахилу шнека живильника і  $C = 1$  для живильників з вертикальним шнеком [9].

Тоді

$$m_n = Q_{e.n} T_\Sigma = 47 T_\Sigma D_{e.n}^2 t_{e.n} n_{e.n} f \cdot \rho_o C. \quad (13)$$

Умовою для визначення габаритів і потужності електродвигунів сушарки, а також температури і витрати повітря, що подається через сопла 18 є

$$\frac{m_n}{T_\Sigma n_ч} \geq \frac{0,2 M_{c.o}}{24 \cdot 60 \cdot 60} = 432000 \cdot M_{c.o}, \quad (14)$$



де  $M_{c.o}$  – добова маса відходів підприємства вологістю 90 – 95%.

Сумарну потужність електродвигунів сушарки знаходимо за формулою

$$N_{\Sigma} = N_{e.n} + N_{z.n} + N_{\partial} + N_{\epsilon} + N_{\kappa}, \quad (15)$$

де  $N_{e.n}$ ,  $N_{z.n}$ ,  $N_{\partial}$ ,  $N_{\epsilon}$ ,  $N_{\kappa}$  - потужність електродвигунів вертикального 5 і горизонтального 3 живильників, дробарки 10, вібробункера 13, а також компресора для подачі теплоносія через сопла 18.

Складові  $N_{e.n}$ ,  $N_{z.n}$  у формулі (15) знаходимо за допомогою залежностей [5]

$$N_{e.n} = 0,006 \cdot Q_{e.n} L_{e.n}; N_{z.n} = 0,006 \cdot Q_{z.n} L_{z.n}. \quad (16)$$

Потужність електродвигуна молоткової дробарки [5]

$$N_{\partial} = K_1 K_2 \rho_o D_p^2 L_p \omega_p, \quad (17)$$

де  $K_1$  – емпіричний коефіцієнт, який залежить від типу та розмірів осередків сита, фізико-механічних властивостей відходів (вид, міцність, крупність тощо);  $K_2 = 6,4 \div 10,5$  - емпіричний коефіцієнт, що враховує ступінь подрібнення відходів (менше значення  $K_2$  приймають при грубому подрібненні, а великі - при тонкому);  $D_p$ ,  $L_p$ ,  $\omega_p$  - діаметр, довжина і частота обертання ротора дробарки.

Розрахунок складової  $N_{\epsilon}$  повністю наводиться в роботі [10] і внаслідок його громіздкості тут не повторюється.

Визначення потужності  $N_{\kappa}$  ведемо за формулою [11]

$$N_{\kappa} = K_3 \frac{Q_{\epsilon} p_{\epsilon}}{\eta_{\kappa} \eta_n}, \quad (18)$$

у якій  $K_3 = 1,1 \div 1,2$  – коефіцієнт запасу;  $Q_{\epsilon}$ ,  $p_{\epsilon}$  – необхідні подача та тиск теплоносія (пропонується визначати емпірично, виходячи з температури теплоносія та необхідної продуктивності сушіння);  $\eta_{\kappa}$ ,  $\eta_n$  - ККД компресора та його привода.

Наведені залежності дозволяють визначити основні експлуатаційні параметри пропонованої сушарки та порівняти її за ефективністю з відомим обладнанням для сушіння.

**Висновки.** 1. Перспективним напрямком перероблення вологих дисперсних відходів харчових виробництв (спиртової барди, пивної дробини, бурякового жому, кавового та ячмінного шלאму, фруктової макухи) є їх зневоднення до вологості 20 – 25% з подальшим використанням в якості палива або добавок до сільськогосподарських кормів. Але для тривалого зберігання даних відходів потрібна вологість не вище 8%, яку можна забезпечити тільки за рахунок комбінованого сушіння з

використанням механічних та термічних методів.

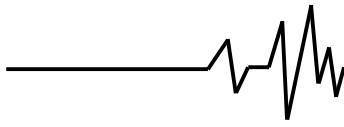
2. Автором проведений аналіз переваг та недоліків відомого обладнання для сушіння вологих дисперсних матеріалів та зроблено висновок, що раціональним варіантом є сушарки для зневоднення у псевдозрідженому або віброкиплячому шарі, що забезпечують високу продуктивність робочого процесу при помірних енерговитратах на його здійснення.

3. З врахуванням результатів проведеного аналізу у статті пропонується схема комбінованої сушарки, в якій перероблювані відходи послідовно проходять через стадії механічного зневоднення у шнекових живильниках, подрібнення у молотковій дробарці, обробку на віброситах з просторовим динамічним навантаженням та прикінцеве теплове зневоднення в псевдозрідженому стані у струменях гарячого повітря або пари, що є вторинними продуктами підприємства. При цьому у пропонованій сушарці передбачений замкнений робочий процес, що дозволяє за потребою проводити зневоднення однієї і тої самої порції відходів декілька разів до досягнення оптимальної кінцевої вологості.

4. Розроблені рівняння та залежності для визначення тривалості зневоднення відходів на кожній стадії робочого процесу сушарки, її продуктивності за зневодненими відходами та сумарної потужності електродвигунів пропонованого обладнання. Все це дозволяє оцінити ефективність розглядуваної сушарки в порівнянні з іншими машинами аналогічного призначення.

#### Список використаних джерел

1. Kaletnik H., Sevostianov I., Bulgakov V., Holovach I., Melnik V., Ihnatiev Ye, Olt J. Development and examination of high-performance fluidisedbed vibration drier for processing food production waste. *Agronomy Research*, 2020. N 18(4). P. 2391-2409. DOI: <https://doi.org/10.15159/AR.20.234>.
2. Bulgakov V., Sevostianov I., Kaletnik G., Babyn I., Ivanovs S., Holovach I., Ihnatiev Y. Theoretical Studies of the Vibration Process of the Dryer for Waste of Food. *Rural sustainability research*, 2020. Vol. 44. N 339. P. 32-45. DOI: <https://doi.org/10.2478/plua-2020-0015>.
3. Черевко О. І., Поперечний А. М. Процеси і апарати харчових виробництв: підручник. Х.: Світ Книг, 2019. 495 с.



4. Севостьянов І. В. Технологія та обладнання для віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів : монографія. Вінниця : ВНАУ, 2020. 303 с. ISBN 978-617-7789-16-0.

5. Марценюк О.С. Процеси і апарати харчових виробництв. Основні поняття та закони: підручник. К.: НУХТ, 2021. 400 с.

6. Sevostianov I., Ivanchuk Ya. Kravets S. Elaboration and researches of highly effective installation for vibro-blowing dehydration of dispersive waste of food productions. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, 2020. № 3 (110). С. 24-33.

7. Севостьянов І.В., Краєвський С.О., Севостьянов В.І. Установки з гідроприводом для розділення вологих дисперсних систем. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, 2021. № 3 (114). С.104-112. DOI: 10.37128/2520-6168-2021-3-12.

8. Колісниченко Е. В., Мандрика А. С., Панченко В. О. Гідравліка, гідро- та пневмоприводи. Суми: Сумський державний університет, 2021. – 176 с.

9. Sevostyanov I., Ivanchuk Y. Modelling of working process of equipment with hydraulic drive for separation of damp dispersive materials. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, 2022. № 1 (116). С.77-82. DOI: 10.37128/2520-6168-2022-1-9.

10. Sevostyanov I., Ivanchuk Y. Elaboration and researches of a vibro-press for dehydration of damp dispersive materials. *Вібрації в техніці та технологіях*, 2022. № 1 (104). С. 5-11. DOI: 10.37128/2306-8744-2022-1-1.

11. Sevostyanov I. Determination of optimal design and working parameters of a vibro-press for dehydration of damp dispersive wastes of food industry. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, 2022. № 2 (117). С.87-96. DOI: 10.37128/2520-6168-2022-2-9.

12. Sevostyanov I. Elaboration of processes of vibro-blowing dehydration of damp dispersive materials in a closed press-form. *Вібрації в техніці та технологіях*, 2022. № 2 (105). С. 5-16. DOI: 10.37128/2306-8744-2022-2-1.

13. Sevostyanov I., Melnyk O. Systems of automatic control for hydroponic technological complexes. *Вібрації в техніці та технологіях*, 2022. № 2 (105). С. 76-83. DOI: 10.37128/2306-8744-2022-2-8.

## References

1. Kaletnik, H., Sevostianov, I., Bulgakov, V., Holovach, I., Melnik, V., Ihnatiev, Ye., Olt, J. (2020) Development and examination of high-performance fluidisedbed vibration drier for processing food production waste. *Agronomy Research*. 18(4), P. 2391 – 2409.

2. Bulgakov V., Sevostianov I., Kaletnik G., Babyn I., Ivanovs S., Holovach I., Ihnatiev Y. (2020) *Theoretical Studies of the Vibration Process of the Dryer for Waste of Food*. *Rural sustainability research* 44 (339).

3. Cherevko, O. I., Poperechny, A. M. (2019) *Procesy i aparaty harchovykh vyrobnyctv [Processes and apparatuses of food productions]* Harkiv.: Svit Knyg [in Ukrainian].

4. Sevostianov, I. (2020) *Technology and equipment for vibro-blowing dehydration of damp dispersive materials*. *Monograph*. Vinnytsia: VNAU [in Ukrainian].

5. Martseniuk, O. S. (2021) *Protsesy i aparaty kharchovykh vyrobnyctv Osnovni poniattia i zakony [Processes and apparatuses of food productions. Main lows and conceptions]*. Kyiv : NUKhT, [in Ukrainian].

6. Sevostianov I., Ivanchuk Ya. Kravets S. (2020) Elaboration and researches of highly effective installation for vibro-blowing dehydration of dispersive waste of food productions. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*. 3 (110). 24-33.

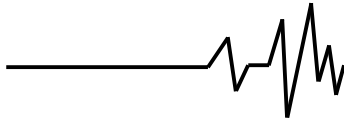
7. Sevostianov I.V., Kraievskiy S.O., Sevostianov V.I. (2021) *Ustanovky z hidropyvodom dlia rozdilennia volohykh dyspersnykh system [Installations with hydraulic drive for separation of damp dispersive systems]*. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*. 3 (114). 104-112. [in Ukrainian].

8. Kolisnichenko E. V., Mandryka A. S., Panchenko V. O. (2021) *Hidravluka, hidro- ta pnevmopryvody*. Sumy: Sumskiy derzhavnyi universytet. [in Ukrainian].

9. Sevostyanov I., Ivanchuk Y. (2022) Modelling of working process of equipment with hydraulic drive for separation of damp dispersive materials. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*. 1 (116). 77-82.

10. Sevostyanov I., Ivanchuk Y. (2022) Elaboration and researches of a vibro-press for





dehydration of damp dispersive materials. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*. 1(104). 5-11.

11. Sevostyanov I. (2022) Determination of optimal design and working parameters of a vibro-press for dehydration of damp dispersive wastes of food industry. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*. 2 (117). 87-96.

12. Sevostyanov I. (2022) Elaboration of processes of vibro-blowing dehydration of damp dispersive materials in a closed press-form. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*. 2 (105). 5-16.

13. Sevostyanov I., Melnyk O. (2022) Systems of automatic control for hydroponic technological complexes. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*. 2 (105). 76-83.

#### **DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A VIBRATING DRYER FOR PROCESSING OF WET DISPERSED WASTE OF FOOD INDUSTRIES**

*Annotation. One of the most urgent problems of Ukrainian food industry enterprises (in particular, sugar, alcohol, brewery, coffee), as well as enterprises producing fruit and berry juices, is the processing of wet dispersed waste with an initial moisture content of 90-95%. As practice has shown, these wastes after dehydration to a moisture content of 20-25% can be effectively used as valuable additives to agricultural fodder or as fuel. At the same time, the specified final humidity can be ensured by the sequential implementation of*

*mechanical methods of dewatering the processed material on a vibrating screen, in a screw press and vibrating impact load in a closed press-form, which allows to significantly reduce energy costs compared to thermal dehydration. But for longer storage of the specified waste, a moisture content of no higher than 8% is required, which can be achieved only after their additional heat treatment. The article proposes a scheme of a combined dryer in which processed waste sequentially passes through the stages of mechanical dehydration in screw feeders, grinding in a hammer crusher, processing on vibrating screens with spatial dynamic loading and final thermal dehydration in a fluidized state in jets of hot air or steam, which are secondary products of this enterprise. At the same time, the offered dryer provides a closed working process, which allows, if it necessary, to dehydrate the same portion of waste several times until the optimal final moisture is reached. The article also presents equations and dependencies for determining the duration of waste dehydration at each stage of the dryer's work process, its productivity in terms of dehydrated waste and the total power of the electric motors of the proposed equipment. All this allows you to evaluate the effectiveness of the considered dryer in comparison with other machines of a similar purpose.*

**Key words:** vibrating dryer, grinding, fluidized bed, food production waste, productivity, capacity

#### **Відомості про авторів**

**Севостьянов Іван Вячеславович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Технологічних процесів та обладнання переробних і харчових виробництв» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: ivansev70@gmail.com).

**Sevostianov Ivan** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of “Technological Processes and Equipment of Processing and Food Productions” of Vinnytsia National Agrarian University (3 Sonyachna St, Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: ivansev70@gmail.com).