

**ЗАКЛАД ВИЩОЇ ОСВІТИ «ПОДІЛЬСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ»
ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

Кафедра технічного сервісу і загальнотехнічних дисциплін

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

НА ТЕМУ:

**«ОБГРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВІБРООЗОНУЮЧОГО
КОМПЛЕКСУ ДЛЯ СУШІННЯ ЗЕРНА»**

Виконав:

здобувач освітнього ступеня «Магістр»
освітньо-професійної програми
«Агроінженерія»
спеціальності 208 «Агроінженерія»
денної форми навчання
МАЙСТРУК Сергій Васильович

Керівник:

канд. тех. наук, доцент

ПІДЛІСНИЙ Віталій Володимирович

Оцінка захисту:

Національна шкала _____

Кількість балів _____ Шкала ECTS _____

« _____ » _____ 20__ р.

Допускається до захисту:

« _____ » _____ 20__ р.

Гарант освітньо-професійної програми «Агроінженерія»
спеціальності 208 «Агроінженерія»
канд. тех. наук, доцент

(підпис)

ДУГАНЕЦЬ Василь Іванович

З М І С Т

	Стор.
ЗАВДАННЯ.....	4
АНОТАЦІЯ.....	5
РЕФЕРАТ.....	6
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ СУШІННЯ ЗЕРНА ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ.....	11
1.1. Біофізичні властивості зерна, що впливають на процес сушіння.....	11
1.2. Традиційні методи та технології сушіння зерна.....	12
1.3. Вібраційні технології у процесах тепломасообміну.....	14
1.4. Озонування як спосіб інтенсифікації зневоднення та зnezараження зерна.....	16
1.5. Огляд конструкцій зерносушарок та обладнання з вібраційною і озонуючою дією.....	17
1.6 Аналіз недоліків існуючих технологій і обґрунтування необхідності розробки віброозонуючого комплексу.....	23
Завдання дослідження.....	24
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВІБРООЗОННОГО СУШІННЯ ЗЕРНА.....	25
2.1. Фізико-математичні основи процесів сушіння та озонування зерна.....	25
2.2. Оцінка впливу параметрів вібрації на швидкість сушіння.....	26
2.3. Моделювання основних параметрів віброозонуючого сушіння.....	31
2.4. Теоретичні обґрунтування енергетичного балансу коливальної системи.....	33
2.5. Енергофізичні та термодинамічні процеси в електроозонаторі.....	35
Висновок до другого розділу.....	40
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	41

3.1. Загальна характеристика експериментальної установки	41
3.2. Принцип роботи та конструктивні особливості експериментальної установки.	43
3.3. Методика проведення експериментальних досліджень.	45
3.4. Методика визначення дози обробки зерна озонופовітряною сумішшю	47
3.5. Обґрунтування раціональних параметрів дослідного віброозонуючого комплексу	49
Висновок до третього розділу.	56
РОЗДІЛ 4. ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ РОЗРОБЛЕНОГО ВІБРООЗОНУЮЧОГО КОМПЛЕКСУ	57
4.1. Характеристика динамічних параметрів розробленого віброозонуючого комплексу	57
4.2. Обґрунтування енергетичних параметрів віброозонуючого комплексу	60
4.3. Обґрунтування експлуатаційних параметрів розробленого комплексу при сішунні зерна	63
Висновок до четвертого розділу	66
РОЗДІЛ 5. ОБҐРУНТУВАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБЛЕНОГО ВІБРООЗОНУЮЧОГО КОМПЛЕКСУ.	67
5.1. Визначення вартості розробленої машини	67
5.2. Визначення економічної ефективності розробленої машини	69
Висновок до п'ятого розділу.	75
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ	76
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.	77
ДОДАТКИ.	81

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню та обґрунтуванню конструктивно-технологічних параметрів віброозонуючого комплексу для сушіння зернової сировини. Метою є підвищення ефективності сушіння за рахунок поєднання вібраційного впливу та озонування сушильного агенту, що забезпечує швидке вологовиділення, зниження енерговитрат та поліпшення санітарного стану зерна.

Розроблено конструкцію комплексу, математичну модель процесу та виконано експериментальні дослідження динамічних, енергетичних і експлуатаційних характеристик. Встановлено оптимальні режими: температура сушильного агенту $55\text{ }^{\circ}\text{C}$, віброприскорення $20\text{--}25\text{ м/с}^2$, концентрація озону 10 мг/м^3 .

Отримані результати підтверджують доцільність застосування віброозонуючого впливу для підвищення енергоефективності та якості сушіння зерна.

THE SUMMARY

The qualification work is devoted to the study and justification of the design and technological parameters of the vibration-zoning complex for drying grain raw materials. The goal is to increase the efficiency of drying by combining vibration and ozonation of the drying agent, which ensures rapid moisture release, reduced energy consumption and improved grain sanitary condition.

The design of the complex, a mathematical model of the process were developed and experimental studies of dynamic, energy and operational characteristics were performed. The optimal modes were established: drying agent temperature 55°C , vibration acceleration $20\text{--}25\text{m/s}^2$, ozone concentration 10mg/m^3 .

The results obtained confirm the feasibility of using vibration-zoning to increase energy efficiency and grain drying quality.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра складається з пояснювальної записки, виконаної на 81 аркуші друкованого тексту формату А4, яка вміщує 5 розділів, 14 таблиць, 14 рисунків, 65 формул, 41 найменування використаних джерел і презентаційний матеріал на 15 слайдах.

Метою роботи є підвищення продуктивності та зниження енерговитрат при сушінні зернової сировини шляхом розробки та обґрунтування технологічних параметрів віброозонуючого комплексу.

В роботі виконано аналіз технологічних процесів сушіння зерна та технічних засобів, виконано теоретичні дослідження технологічного процесу віброозонного сушіння зерна, розроблено експериментальну установку та проведено дослідження, виконано обґрунтування параметрів роботи розробленого віброозонуючого комплексу та обґрунтована економічна ефективність розробеного віброозонуючого комплексу.

Ключові слова: ВІБРООЗОНУЮЧИЙ КОМПЛЕКС, СУШІННЯ ЗЕРНА, ОЗОНУВАННЯ, ВІБРОПРИСКОРЕННЯ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ.

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ, СИМВОЛІВ,
ПОЗНАЧЕНЬ**

Скорочення	Розшифровка скорочень
ОС	Освітній ступінь
КР	Кваліфікаційна робота
ДСТУ	Державний стандарт України
ЕК	Екзаменаційна комісія
РР	Режим роботи
МТВ	Механіко-технологічні властивості
РЦКП	Рототабельний центральо-композиційний план
ТУ	Технічні умови
ТС	Технологічна схема
ККД	Коефіцієнт корисної дії
СА	Сушильний агент
РП	Розрядний пристрій
СУ	Сушильна установка
a	Віброприскорення
T_{CA}	Температура сушильного агента
NO_3	Концентрація озону
t_0	Час обробки
W_k	Вологість зернової сировини
N	Потужність
ω	Кутова швидкість
C_t	Теплоємність електроозонатора
A_t	Коефіцієнт тепловіддачі
V	Об'єм повітря
ρ	Густина повітря

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасне зернопереробне виробництво вимагає підвищення продуктивності та ефективності технологічних процесів післязбиральної обробки, зокрема сушіння зернової сировини. Зростання обсягів виробництва та потреба у високоякісному посівному матеріалі ставлять нові вимоги до обладнання: скорочення часу сушіння, підвищення енергоефективності, збереження якості зерна та зменшення технологічних втрат.

Існуючі зерносушарки характеризуються низькою ефективністю, великою метало- та енергоємністю, складністю обслуговування та високою вартістю, що обмежує їхнє застосування в промисловому масштабі. Крім того, традиційні методи сушіння не завжди забезпечують належний контроль вологості та розвиток патогенних мікроорганізмів, що негативно впливає на схожість і збереження зерна.

Інтенсифікацію процесу можна досягти шляхом застосування комплексного впливу, який поєднує механічні вібрації з озонуванням сушильного агенту. Вібрації сприяють рівномірному переміщенню зернової маси та активізації тепло- і масообміну, а озон прискорює виділення вологи та зменшує ризик розвитку грибків і бактерій.

Отже, розробка віброозонуючого комплексу, що забезпечує одночасне підвищення продуктивності та енергоефективності процесу сушіння зернової сировини, є актуальною науково-технічною задачею для сучасного зернопереробного виробництва.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами досліджень. Робота виконувалась у відповідності з Державною науковою програмою “Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі” на 2020-2025 рр. Відповідає напрямкам наукових досліджень кафедри технічного сервісу і загальнотехнічних дисциплін інженерно-технічного факультету.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення продуктивності та зниження енерговитрат при сушінні зернової сировини шляхом розробки та обґрунтування технологічних параметрів віброозонуючого комплексу. Для досягнення поставленої мети були визначені наступні завдання:

1. Провести аналіз процесу сушіння зернової сировини та визначити основні напрями його інтенсифікації за умови застосування технології озонування.

2. Розробити математичну модель розподілу концентрації озону по глибині шару зерна та спроектувати конструкцію віброозонуючого комплексу для обробки зернової сировини під час сушіння.

3. Обґрунтувати конструктивно-технологічні параметри розробленого комплексу та визначити його оптимальні режими роботи.

4. Оцінити економічну ефективність використання віброозонуючого комплексу в процесі сушіння зернової сировини.

Об'єктом дослідження є процес сушіння зернової сировини в умовах віброзваженого стану з застосуванням технології озонування.

Предметом дослідження виступає віброозонуючий комплекс для сушіння зернової сировини та закономірності зміни його технологічних і якісних параметрів у процесі роботи.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження виконувалися на основі принципів теорії сушіння, тепломасообміну та математичного моделювання технологічних процесів із застосуванням методів вищої математики. Експериментальні дослідження проводилися відповідно до розроблених та чинних методик і галузевих стандартів на створеній експериментальній установці із використанням багатофакторного планування експерименту та методів статистичної обробки отриманих результатів.

Практичне значення отриманих результатів. Результати проведених досліджень мають практичне значення для підвищення ефективності сушіння зернової сировини. Розроблений віброозонуючий комплекс дозволяє скоротити тривалість технологічного процесу, знизити енерговитрати на одиницю продукції та підвищити якість зерна за рахунок зменшення залишкової

вологості та пригнічення розвитку патогенних мікроорганізмів. Отримані дані щодо оптимальних конструктивно-технологічних параметрів комплексу можуть бути використані при проектуванні та модернізації промислових сушильних установок, а також для впровадження енергоефективних та ресурсозберігаючих технологій у зернопереробному виробництві.

Апробація результатів роботи. Основні положення роботи доповідалися й обговорювалися на науково-практичних конференціях ЗВО «Подільський державний університет» у 2024-2025р.

Публікації. Основний зміст роботи опубліковано в 1 друкованій публікації: Майструк С.В., Підлісний В.В. Обґрунтування конструкції віброозонуючого комплексу для сушіння зерна // Перші наукові кроки – 2025: збірник наукових праць XIX Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів та молодих науковців (17 квітня 2025 р., м. Кам'янець-Подільський). Кам'янець-Подільський: 2025. 57 с.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ СУШІННЯ ЗЕРНА ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ

1.1 Біофізичні властивості зерна, що впливають на процес сушіння

Процес сушіння зернових матеріалів визначається комплексом біофізичних властивостей, які формують умови тепломасообміну, швидкість виведення вологи та стійкість зерна до зовнішніх впливів. Зернина як об'єкт теплової обробки є біологічною системою зі складною внутрішньою структурою, що значно відрізняє її від інертних матеріалів і зумовлює специфіку взаємодії з тепловими та аеродинамічними потоками.

Одним із ключових параметрів є вологість зерна, яка визначає початковий стан матеріалу та обумовлює необхідну інтенсивність сушіння. Волога в зернівці перебуває у двох основних формах: зв'язана, що утримується колоїдами й клітинними структурами, та вільна, яка знаходиться у міжклітинному просторі. Зв'язана волога виводиться значно повільніше, що потребує забезпечення оптимального температурного режиму, аби не спричинити руйнування клітин чи зниження схожості насіння. Швидкість переходу вологи з внутрішніх шарів до поверхні зернини істотно залежить від її фізико-колоїдних властивостей, ступеня зрілості та фази фізіологічного дозрівання.

Важливим чинником є теплопровідність і теплоємність зерна, що визначають динаміку нагрівання його внутрішнього об'єму. Через низьку теплопровідність тепла енергія поступово проникає від поверхні до центру зернини, формуючи характерний градієнт температури. Це впливає на інтенсивність вологовіддачі: надмірне та різке підвищення температури поверхні може призвести до утворення «вологих зон» всередині матеріалу та появи тріщин у перикарпії.

Біофізичні характеристики тісно пов'язані зі структурою і морфологією зерна. Наявність оболонки, ендосперму і зародка визначає неоднорідність у

розподілі вологи та різну швидкість її міграції під час сушіння. Оболонка зерна виконує захисну функцію й водночас створює додатковий дифузійний опір, що може уповільнювати масоперенесення. У зв'язку з цим конструктивні параметри сушильних апаратів повинні забезпечувати рівномірний тепловий вплив та запобігати локальному перегріванню поверхні.

До важливих характеристик належить щільність та насипна маса, які визначають газодинамічну поведінку зернової маси під час перемішування чи вібраційного впливу. Чим вища щільність матеріалу, тим інтенсивніший контакт зернин з нагрітим повітрям потрібен для забезпечення рівномірної сушки. У випадку використання вібраційних технологій ці параметри впливають також на рухомість шару та інтенсивність його аерації.

Особливе значення мають гігроскопічність та сорбційні властивості, що визначають здатність зерна поглинати або віддавати вологу залежно від відносної вологості навколишнього середовища. Зерно, як капілярно-пористий матеріал, характеризується нелінійною залежністю швидкості вологовіддачі від температури та вологості повітря, що потребує ретельного вибору параметрів сушіння. Гігроскопічні характеристики також визначають рівноважну вологість – показник, який обмежує мінімально можливий ступінь висушування без погіршення якості матеріалу.

Отже, біофізичні властивості зерна формують комплекс взаємопов'язаних чинників, що визначають як інтенсивність процесу сушіння, так і якість кінцевого продукту. Їх врахування є фундаментальною передумовою для розроблення конструктивно-технологічних параметрів віброозонуючого комплексу, здатного забезпечити оптимальні режими тепломасообміну та мінімальні втрати біологічної цінності зернової маси.

1.2 Традиційні методи та технології сушіння зерна

Сушіння є одним із ключових етапів післязбиральної обробки зернових культур, від якого значною мірою залежить їх збереженість, технологічність та якість кінцевої продукції. Протягом багатьох десятиліть у зерноочисній галузі

сформувалися традиційні підходи та технічні рішення, які забезпечують відведення надлишкової вологи шляхом тепломасообміну між зерною масою та нагрітим або атмосферним повітрям. Ефективність цих технологій визначається конструктивними особливостями обладнання, режимами сушіння та властивостями зернової сировини.

Одним з найбільш поширених методів є конвективне сушіння, основу якого становить передача тепла зернині через контакт з гарячим або підігрітим повітрям. Конвективні сушарки застосовують у потокових системах для зниження вологості різних культур у широкому діапазоні продуктивності. До їх переваг належать простота конструкції, можливість регулювання температурних режимів та відносно невисока вартість експлуатації. Проте тривала дія високих температур може спричинювати нерівномірність нагрівання, появу мікротріщин та зниження схожості насінневого матеріалу.

Важливе місце займають шахтні сушарки, які працюють у режимі повільного руху зерна через вертикальний канал з чергуванням зон нагрівання та охолодження. Завдяки тривалому й рівномірному впливу теплового потоку такі апарати забезпечують стабільну якість висушеного зерна, проте вони характеризуються значними енергетичними витратами та відносно низькою інтенсивністю сушіння.

У виробничій практиці широко застосовується **барабанне (ротаційне) сушіння**, що ґрунтується на перемішуванні зернової маси в обертовому циліндрі та інтенсивному контакті її з гарячим повітрям. Ця технологія забезпечує високу продуктивність і добре підходить для фуражного зерна. Однак для насінневих культур використання барабанних сушарок обмежене через ризик механічного пошкодження зернівок і негативного впливу на посівні властивості.

Традиційним способом зберігається також **атмосферне (природне) сушіння** на відкритих майданчиках або під навісами, яке базується на взаємодії зерна з сонячною радіацією та вітровими потоками. Метод є енергонезалежним, але його ефективність істотно залежить від погодних умов і не дозволяє

забезпечити стабільні параметри сушіння, що обмежує його використання у промислових масштабах.

Окрему групу становлять *рециркуляційні сушіння*, що передбачають багаторазове пропускання зерна через сушильну установку. Перевагою такого підходу є рівномірність обробки матеріалу та зниження термічного навантаження за рахунок поетапного видалення вологи. Недоліком є збільшення тривалості процесу та значні енерговитрати.

Більш сучасним варіантом традиційних технологій є низькотемпературне сушіння, основою якого є подача слабко підігрітого повітря протягом тривалого часу. Воно дозволяє зберегти фізіологічні властивості насіння, проте потребує великих сушильних площ і значного часу на досягнення кінцевої вологості.

Для інтенсифікації процесу сушіння у ряді традиційних конструкцій застосовують активну вентиляцію, що прискорює видалення вільної вологи та покращує умови тепломасообміну. У поєднанні з перемішуванням або рециркуляцією повітряно-зернової суміші цей метод дозволяє зменшити температурний градієнт та підвищити рівномірність обробки.

Попри широке поширення традиційних способів сушіння, їх недоліками залишаються високі енерговитрати, тривалість сушіння, нерівномірність нагрівання шару та ризики погіршення якості насіннєвого матеріалу. Ці фактори актуалізують необхідність пошуку нових технологічних рішень, здатних забезпечити інтенсивність процесу за мінімальних витрат енергії та без втрат біологічної цінності зерна. Одним із перспективних напрямів є використання вібраційно-озонуючих систем, які поєднують механічну активізацію зернового шару з антисептичними властивостями озону та покращеним газообміном.

1.3 Вібраційні технології у процесах тепломасообміну

Використання вібрацій у процесах тепломасообміну є одним із сучасних напрямів інтенсифікації сушіння зерна та інших дисперсних матеріалів. Вібраційні поля впливають на структуру сипкого шару, підвищують

мобільність частинок, інтенсифікують рух повітря у міжзерновому просторі та покращують умови тепло- й масопереносу. Завдяки цьому вібраційні технології дедалі активніше впроваджуються у сушильні агрегати, особливо там, де необхідно забезпечити рівномірність обробки та зберегти якісні показники зернової сировини.

Однією з ключових особливостей вібраційних технологій у тепломасообміні є їх здатність забезпечувати рівномірність прогрівання зерна по всій товщині шару. У звичайних (невібраційних) сушарках температура окремих зернівок та локальних зон шару може значно відрізнятись, що призводить до появи мікротріщин, зниження схожості та зменшення енергії проростання насіння. Вібраційний режим суттєво зменшує такі ризики, оскільки рух частинок у потоці забезпечує постійну зміну їх положення, що вирівнює тепловий вплив.

Важливим фактором є також поліпшення циркуляції газового середовища. Під дією коливань повітряні канали між зернівками періодично розширюються та звужуються, що створює імпульсні потоки, які посилюють видалення парів вологи. У порівнянні з традиційним нерухомим шаром це дає змогу досягати значно вищої продуктивності за нижчих температур сушіння.

Ефективність тепломасообмінних процесів під дією вібрацій визначається параметрами коливань – частотою, амплітудою та формою сигналу. Низькочастотні коливання зазвичай сприяють переміщенню маси, тоді як високочастотні підвищують інтенсивність мікропереміщень та внутрішню аерацію шару. Раціональний добір параметрів коливань забезпечує мінімальне енергоспоживання при високій швидкості сушіння.

У технологіях післязбиральної доробки зерна вібраційні системи використовують у вигляді вібраційних транспортерів, вібраційних полиць, віброколивальних сушарок та комбінованих установок, де вібрація поєднується з аеродинамічними або інфрачервоними методами нагрівання. Особливо перспективними є комплекси, у яких вібраційний вплив поєднується з активним газорозподілом або озонуванням, що одночасно прискорює сушіння та пригнічує розвиток патогенної мікрофлори.

Застосування вібраційних методів у процесах тепломасообміну дозволяє розв'язати низку характерних проблем традиційних технологій: зменшити тривалість сушіння, знизити температуру агента сушіння, підвищити рівномірність обробки зерна та мінімізувати термомеханічні пошкодження. Це робить вібраційні технології важливим елементом модернізації сучасних зерносушильних комплексів та створює основу для розроблення високоефективних енергоощадних систем, зокрема віброозонуючих комплексів нового покоління.

1.4 Озонування як спосіб інтенсифікації зневоднення та знезараження зерна

Озонування є перспективним інноваційним методом обробки зерна, який поєднує знезаражувальний, окиснювальний та сушильний ефекти. Озон (O_3) – одна з найсильніших природних окиснювальних речовин, здатна ефективно руйнувати мікрофлору, спори грибів, комах-шкідників та продукти їх життєдіяльності. Завдяки своїй високій реакційній здатності озон активно взаємодіє з мембранами мікроорганізмів, порушує їх цілісність та призводить до повного інактивування патогенів. Це дозволяє використовувати озон як екологічно безпечну альтернативу хімічним фумігантам, що є особливо важливим у зернопереробній галузі з урахуванням вимог до безпечності харчових продуктів.

У контексті процесу сушіння зернової маси озонування виконує декілька функцій, що сприяють інтенсифікації тепломасообміну. По-перше, озоноване повітря має вищу окиснювальну здатність, що дозволяє знизити бактеріальне та грибкове навантаження на поверхні зернівок уже на початкових етапах сушіння. Зменшення кількості мікроорганізмів запобігає вторинному самозігріванню та росту мікробіоти, яка може спричиняти локальні осередки підвищеної вологості.

По-друге, озонування впливає на фізико-хімічний стан оболонки зерна. Під дією озону відбувається часткове руйнування воскового шару та зміна

гідрофільності зовнішніх тканин, що полегшує дифузію вологи з внутрішніх шарів ендосперму. Це сприяє прискоренню масопереносу та зменшенню тривалості зневоднення без підвищення температури сушильного агента, що є критично важливим для зерна, чутливого до перегрівання.

По-третє, озонування здатне впливати на газовий склад сушильного середовища. Активація повітря шляхом утворення озono-кисневої суміші підвищує його реакційну здатність та дозволяє зменшити енергетичні витрати на досягнення необхідної глибини знезараження зерна. Додатковим ефектом є усунення неприємних запахів та продуктів біохімічного розкладання зернової маси.

Застосування озону у поєднанні з вібраційними технологіями створює синергетичний ефект. Вібраційний вплив забезпечує постійне переміщення та розпушення зернової маси, що збільшує площу контакту між озонованим повітрям і поверхнею зерна. У результаті озон рівномірно розподіляється в об'ємі зернової суміші, забезпечуючи одночасне знезараження та оптимізацію процесів зневоднення. Це дозволяє підвищити продуктивність сушильного обладнання та отримати зерно з підвищеними показниками зберігання без використання хімічних препаратів.

Таким чином, озонування є ефективним та екологічно безпечним засобом інтенсифікації процесів сушіння зерна. Воно забезпечує глибоке знезараження, прискорює масоперенос, знижує енергетичні витрати та покращує якість кінцевого продукту. Використання озону у складі віброозонуючих комплексів відкриває нові можливості для розроблення високоефективних технологічних систем післязбиральної обробки зерна.

1.5 Огляд конструкцій зерносушарок та обладнання з вібраційною і озонуючою дією

Сучасні технології сушіння зерна ґрунтуються на поєднанні різних фізичних методів тепломасообміну, спрямованих на підвищення ефективності зневоднення, зменшення енергоспоживання та забезпечення високої якості

готової продукції. Значний інтерес становлять конструкції зерносушарок, у яких реалізовано вібраційний вплив на зернову масу, а також обладнання, що використовує озонування для знезараження і прискорення сушіння. Інтеграція цих технологій формує новий напрям розвитку енергоощадних і екологічно безпечних систем післязбиральної обробки зерна.

Зернові сушарки, відповідно до міжнародної класифікації винаходів, відносяться до класів F26B 17/04–17/14, F26B 5/16 та F26B 01/00.

Серед відомих рішень варто зазначити установку з віброкиплячим шаром для сушіння сільськогосподарської продукції АІ-КВО (рис. 1.1) [7].

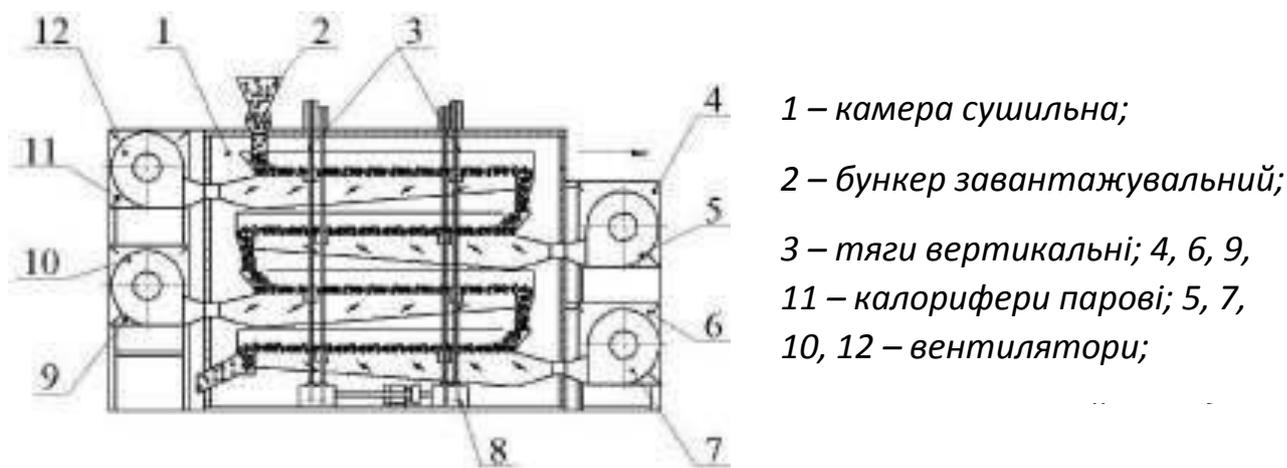


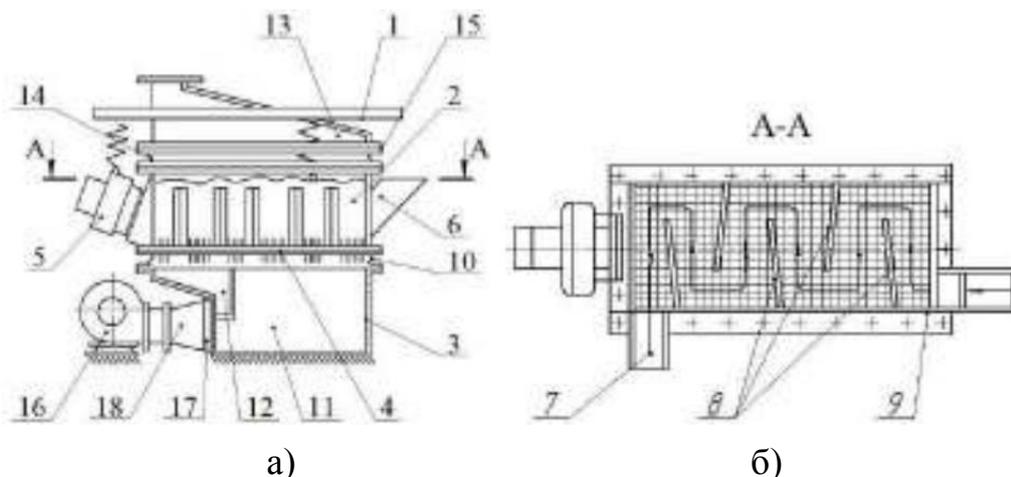
Рисунок 1.1 – Віброосушальна установка АІ-КВО

Віброосушальна установка АІ-КВО складається з камери, всередині якої розташовані чотири сушильні коробки, розміщені вертикально один під одним і з'єднані попарно вертикальними тягами, що пов'язані з ексцентриковим приводом та ресорами. Під дією ексцентриків пари коробів здійснюють коливальні рухи, що забезпечує перемішування матеріалу та його просушування шляхом обдування сушильним агентом.

До основних недоліків цієї установки відносяться складність конструкції, значні габаритні розміри та висока металоємність, що ускладнює її експлуатацію та підвищує витрати на виготовлення.

Інший відомий варіант сушарки для сипких матеріалів функціонує за принципом віброкиплячого шару. Вона складається з сушильної камери, яка через гнучкі елементи з'єднана з напірною камерою. Конструкція віброосушарки виконана у вигляді лабіринту, утвореного ребрами, встановленими

перпендикулярно до газорозподільної решітки і розташованими в шаховому порядку. Під дією коливань матеріал на решеті піддається псевдорозрідженню і переміщується по лабіринту, що сприяє рівномірному просушуванню.



*Рисунок 1.2 – Сушарка для сипких матеріалів у віброкиплячому шарі
 а – вид загальний; б – розріз; 1 – рама; 2, 3 – сушильна і напірна камери; 4 – решітка газорозподільна; 5 – віброприводи; 6, 7 – лотки завантажувальний і розвантажувальний; 8 – ребра; 9 – стінки камери; 10, 14 – гнучкі елементи; 11, 12 – секції подачі теплоносія та повітря; 13 – короб; 15 – пружний елемент; 16 – вентилятор; 17 – калорифер; 18 – система подачі повітря*

Для підвищення інтенсивності тепловіддачі теплообмінним поверхням у деяких установках нагріву застосовуються горизонтальні коливання, створювані двовальним вібратором спрямованої дії. Такі коливання формують у прилеглий зоні локальні області псевдорозрідження, що сприяє активнішому контакту матеріалу з нагрітою поверхнею. Основними недоліками цих установок є складність експлуатації та обслуговування, що обмежує їх практичне використання.

Багатоярусна вібраційна сушарка (рис. 1.3) дозволяє досягати рівномірного нагріву продукції з різним вмістом вологи та ступенем забруднення. У її конструкції застосовані похилі лотки, розташовані один над одним на спіральних пружинах всередині корпусу. Коливання лотків у вертикальній площині забезпечуються вертикальними штангами, кулачковим механізмом та системою важелів.

Частота коливань регулюється в межах 6,5–16 Гц за допомогою зміни шківів на пасовій передачі приводу, а амплітуда коливань змінюється в діапазоні 4,5–10 мм шляхом коригування ексцентриситету кулачків механізму. Така конструкція забезпечує ефективне перемішування матеріалу та інтенсифікацію процесу сушіння.

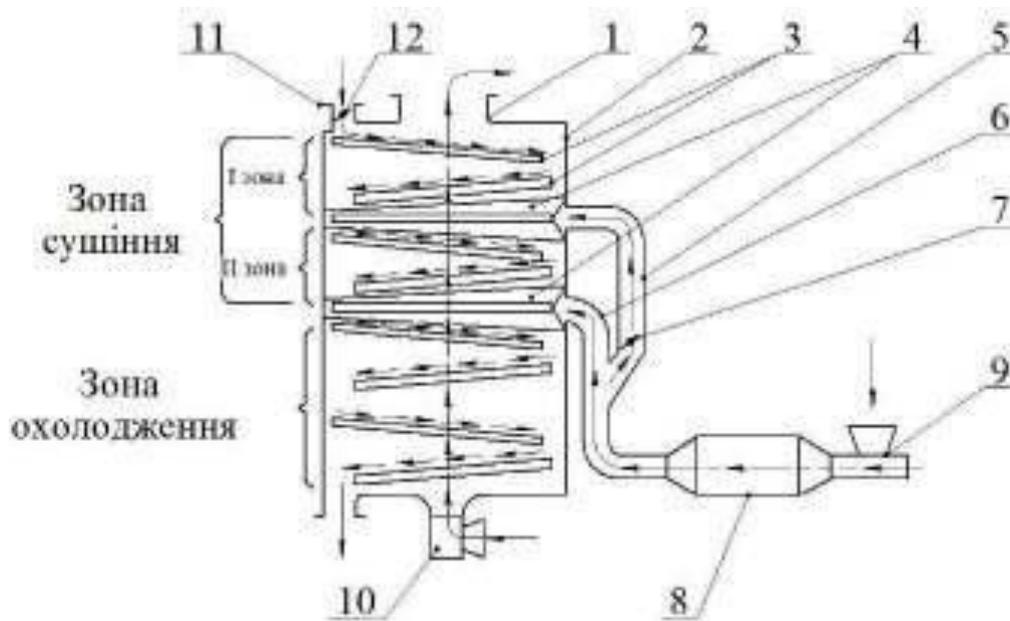


Рисунок 1.3 – Багатоярусна вібраційна сушарка

1 – патрубок; 2 – корпус секційний; 3 – лотки похилі; 4 – колектори розподільні; 5, 6 – трубопроводи; 7, 12 – заслінки; 8 – нагрівач; 9, 10 – вентилятори; 11 – бункер завантажувальний.

Кожен лоток з трьох боків оснащений гнучкими ущільненнями, які запобігають витоку сушильного агента та просипанню продукції. Матеріал, що потрапляє у завантажувальний бункер, проходить по лотках через зони з різними температурами теплоносія, а потім направляється в зону охолодження перед виходом із сушарки.

Серед недоліків багатоярусної вібраційної сушарки виділяють значні габаритні розміри та складність конструкції, що ускладнює монтаж, обслуговування та транспортування.

У наступній конструкції (рис. 1.4) вібрації передаються безпосередньо потоку матеріалу, який формує віброкиплячий шар. Інтенсивний рух усіх частинок запобігає утворенню конгломератів та налипанню, забезпечуючи рівномірне переміщення і сушіння матеріалу [7].

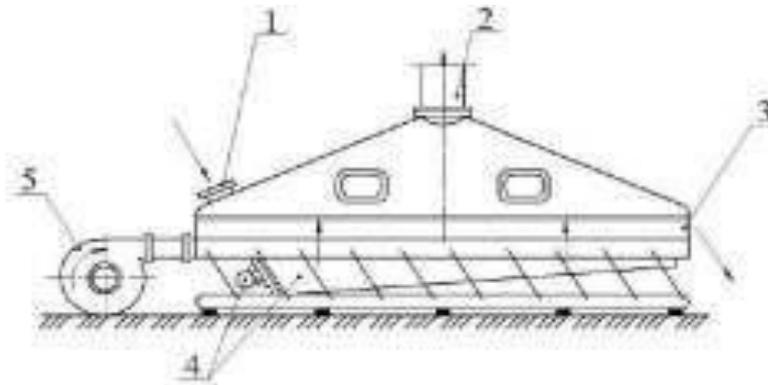


Рисунок 1.4 – Агрегат сушильний з киплячим шаром та коливним транспортером

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

Сушильний агрегат, наведений на рис. 1.4, поєднує принципи вібраційного транспортування та формування киплячого шару матеріалу. Подавання зернової маси здійснюється через завантажувальний отвір, після чого під дією коливань вона переходить у стан псевдорозрідження, що інтенсифікує тепло- і масообмін. Вентилятор подає сушильний агент у робочу камеру, а відпрацьоване повітря видаляється через витяжний канал. Формування стійкого киплячого шару забезпечується вібробуджувачем, який створює необхідну амплітуду та частоту коливань, попереджаючи злипання частинок та утворення застійних зон.

Одним із прикладів промислового обладнання аналогічного типу є установка фірми «Петрі і Мак Наут» [15]. Вона складається з двох функціональних ярусів, призначених відповідно для сушіння та охолодження зерна.

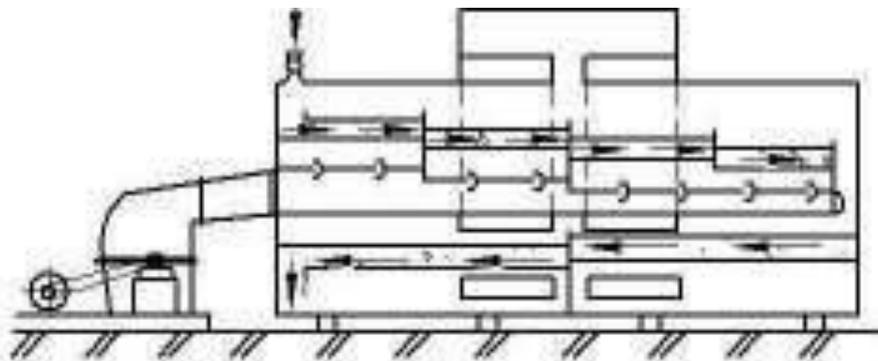


Рисунок 1.5 – Установка з киплячим шаром фірми «Петрі і Мак Наут»

У конструкції застосовано похилі газорозподільні решітки, оснащені підпирними стінками, які забезпечують регулювання товщини зернового шару, рівномірність його розподілу та швидкість руху (рис. 1.5). Такий підхід дозволяє створювати стабільний режим сушіння і підтримувати оптимальні умови для якісного тепломасообміну.

Аналіз наявних конструкцій сушарок, у яких реалізовано вібраційний вплив, засвідчує, що вони мають низку суттєвих експлуатаційних та конструктивних недоліків. До основних проблем слід віднести складність технічної реалізації, підвищені вимоги до обслуговування, а також значні масо-габаритні показники обладнання. Крім того, більшість сучасних віброосушальних систем не забезпечують одночасного виконання таких важливих технологічних функцій, як знезараження зернової маси та пригнічення фізіологічних і біохімічних процесів, що активізуються в насініні під час тривалого зберігання. Це обмежує їх ефективність і вимагає пошуку нових підходів до організації процесів сушіння та підготовки зерна [14–16].

Найбільш перспективним напрямком є створення комбінованих віброозонуючих комплексів, у яких поєднані переваги обох технологій. У таких системах зерно перебуває у стані інтенсивного перемішування через вібрації, що забезпечує рівномірне проникнення озono-кисневої суміші всередину зернової маси. Конструкції комбінованих установок можуть включати вібраційні лотки, ситові деки, канали псевдозрідженого шару та модулі для генерування озону. Синергетичне поєднання коливальних процесів та окиснювального впливу озону дозволяє досягти значного скорочення енергозатрат та підвищення ефективності сушіння без застосування високих температур.

Отже, аналіз існуючих конструкцій зерносушарного обладнання свідчить про перспективність інтеграції вібраційних і озонуючих технологій у єдину систему. Такий підхід сприяє створенню високопродуктивних, енергоефективних та екологічно орієнтованих комплексів, здатних забезпечити якісну післязбиральну обробку зернових культур і зменшити втрати під час зберігання.

1.6 Аналіз недоліків існуючих технологій і обґрунтування необхідності розробки віброозонуючого комплексу

Аналіз сучасних сушильних технологій показує, що більшість існуючих систем мають низку суттєвих недоліків, які знижують ефективність процесу та погіршують якість зерна. Основною проблемою традиційних шахтних і конвективних сушарок є нерівномірність прогрівання зернової маси, що призводить до локального перегріву та недосушування окремих фракцій. Це знижує посівні властивості та збільшує енерговитрати через потребу повторного сушіння.

Барабанні та аеродинамічні сушарки характеризуються високою енергоємністю, значним механічним травмуванням зерна та складністю стабілізації повітряного потоку, що особливо критично для дрібних і крихких культур. Крім того, більшість сушильних систем не забезпечують належного мікробіологічного очищення, що сприяє розвитку мікрофлори та накопиченню мікотоксинів.

Недостатнє перемішування зернової маси та утворення ущільнених зон обмежує інтенсивність тепломасообміну. Вібраційні технології частково розв'язують це питання, проте зазвичай застосовуються окремо й не поєднуються з іншими засобами інтенсифікації.

Озонування має значний потенціал щодо знезараження та прискорення зневоднення, проте існує переважно як самостійна технологія й не інтегроване у структуру сушильних комплексів.

З огляду на це, розробка віброозонуючого комплексу є обґрунтованою, оскільки синергетичне поєднання вібрації та озонування забезпечує:

- розпушення та рівномірний рух шару зерна;
- інтенсифікацію тепломасообміну без підвищення температур;
- ефективне мікробіологічне очищення;
- скорочення тривалості сушіння та зменшення енерговитрат.

Отже, новий комплекс дозволяє подолати недоліки існуючих технологій і підвищити якість та безпечність обробленого зерна.

Завдання дослідження

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються наступні завдання:

1. Провести аналіз процесу сушіння зернової сировини та визначити основні напрями його інтенсифікації за умови застосування технології озонування.

2. Розробити математичну модель розподілу концентрації озону по глибині шару зерна та спроектувати конструкцію віброозонуючого комплексу для обробки зернової сировини під час сушіння.

3. Обґрунтувати конструктивно-технологічні параметри розробленого комплексу та визначити його оптимальні режими роботи.

4. Оцінити економічну ефективність використання віброозонуючого комплексу в процесі сушіння зернової сировини.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВІБРООЗОННОГО СУШІННЯ ЗЕРНА

2.1 Фізико-математичні основи процесів сушіння та озонування зерна

Процеси сушіння та озонування зерна є критично важливими етапами післязбиральної обробки, які визначають якість, збереженість та безпеку насінневого та товарного зерна. Вони належать до комплексних тепло- і масопереносних процесів, що включають взаємодію зернових частинок із повітряним потоком, вологою та активними газами, зокрема озоном.

Сушіння зерна є процесом видалення вологи із його внутрішньої структури та поверхні шляхом теплообміну і масопереносу. Основними фізичними явищами, що визначають ефективність сушіння, є:

1. Теплопровідність зерна – визначає швидкість передачі тепла від поверхні до внутрішньої частини зерна. Теплопровідність залежить від вмісту вологи, щільності та температури зерна.

2. Масоперенос вологи – характеризує міграцію води із внутрішніх шарів зерна до його поверхні і далі в сушильне середовище. Основними механізмами є дифузія та конвекція.

3. Кінетика сушіння – описується залежністю швидкості видалення вологи від різниці вологості між зерном і оточуючим повітрям. Для більшості зернових культур процес можна подати у вигляді рівнянь дифузії у сферичній або еліпсоїдній системі координат:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{\text{eff}} \nabla^2 \cdot X, \quad (2.1)$$

де X – локальна вологість зерна, %;

t – час сушіння, с.

D_{eff} – ефективний коефіцієнт дифузії вологи, який залежить від температури та вологості зерна.

Озонування зерна полягає у обробці його озono-кисневим газовим потоком, що має високу окиснювальну здатність. Озон активно взаємодіє з

бактеріями, пліснявими грибками та іншими мікроорганізмами, забезпечуючи дезінфекцію і запобігання псуванню зерна. Основні фізико-хімічні процеси озонування включають:

1. Молекулярне окислення органічних сполук – озон реагує з клітинними мембранами мікроорганізмів, руйнуючи їхню структуру.

2. Дифузія газу в зернову масу – озон проникає у міжзерновий простір та внутрішню пористу структуру зерна.

Математичне моделювання цих процесів дозволяє прогнозувати динаміку зміни вологості та концентрації озону, оптимізувати режими обробки та оцінювати енергетичні витрати. Застосовуються диференціальні рівняння теплопровідності та масопереносу, враховуються залежності коефіцієнтів дифузії від температури, вологості та складових газового середовища. Моделі часто інтегрують у комп'ютерні програми для розрахунку теплових і масових балансів у сушильних та озонувальних установках.

Таким чином, фізико-математичні основи процесів сушіння та озонування зерна забезпечують можливість наукового обґрунтування конструкцій обладнання, режимів обробки та прогнозування якості обробленого матеріалу. Застосування математичного моделювання дозволяє підвищити ефективність процесів і знизити енергетичні витрати, що є важливим для сучасних технологій післязбиральної обробки зерна.

2.2 Оцінка впливу параметрів вібрації на швидкість сушіння

Під час розв'язання задач, що стосуються підвищення енергоефективності сушильних установок, необхідно оперувати кількісними показниками, які виступають критеріями ефективності або цільовими характеристиками процесу [9, 10].

Одним із ключових індикаторів рівня енергетичного удосконалення зерносушарок є термічний коефіцієнт корисної дії. Цей показник визначають як відношення кількості теплоти, яка була фактично використана для

випаровування вологи з зерна q_k , до загальної теплоти q_3 , спожитої сушильною установкою у процесі зневоднення:

$$\eta_T = \frac{q_k}{q_3}. \quad (2.2)$$

Кількість теплоти, витраченої на нагрівання одного кілограма сухого повітря в теплогенераторі або топковому блоці, визначають за наступною залежністю:

$$q_3 = c_p (t_1 - t_0), \quad (2.3)$$

де c_p – питома теплоємність сухого повітря, Дж/кг·К;

t_1 – температура повітря після нагрівання, °К

t_0 – початкова температура повітря, °К.

Теплота, яка витрачається на випаровування вологи та відноситься до одного кілограма нагрітого (сухого) повітря, визначається з урахуванням зміни вологовмісту сушильного агента. У цьому випадку використовують таку залежність:

$$q_k = r (d_2 - d_1), \quad (2.4)$$

де d_1 та d_2 – відповідно вологовміст сушильного агента на вході та виході із сушарки, кг/м³;

r – питома теплота пароутворення.

Тоді, узагальнене рівняння теплових витрат набуває вигляду:

$$\eta_T = \frac{q_k}{q_3} = r \frac{d_2 - d_1}{c_p \cdot (t_1 - t_0) \cdot \rho_{CA}} \cdot 10^{-3}. \quad (2.5)$$

де ρ_{CA} – густина потоку сушильного агента, виражена у кілограмах на кубічний метр.

Максимальне значення коефіцієнта корисної дії зерносушарки досягається за умови, коли різниця між вологовмістом сушильного агента на вході та виході є найбільшою. Це відповідає ситуації, коли агент на виході із сушильної камери наближається до стану повного насичення, тобто ($d_2 = d_M$), що відповідає 100% відносній вологості, а його температура t_2 прямує до температури насичення t_M .

Для процесів сушіння, що реалізуються за конвективною схемою, виконується співвідношення:

$$\eta = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_0}, \quad (2.6)$$

У наведеному співвідношенні корисною тепловою енергією вважається сума теплоти, яку енергоносії передає робочому середовищу в межах зерносушарки. Тому максимальний коефіцієнт корисної дії може бути подано у вигляді:

$$\eta_{\max} = \frac{t_1 - t_m}{t_1 - t_0}, \quad (2.7)$$

де t_m – температура вологого термометра, °С.

Вплив початкової температури сушильного агента t_1 та його кінцевої температури t_2 на енергетичні показники сушіння є комплексним і не завжди однозначним. З аналізу виразу (2.5) випливає, що підвищення t_1 сприяє зростанню ККД, оскільки інтенсифікується процес випаровування вологи та, відповідно, зменшується температура агента на виході t_2 . Проте результати експериментальних досліджень [12, 13] засвідчують, що збільшення швидкості сушіння супроводжується більш інтенсивним нагріванням зернової маси. Це призводить до зростання частки теплоти, яка витрачається на нагрівання зерна та втрати у навколишнє середовище, порівняно з кількістю теплоти, що входить до сушильної камери з матеріалом. Унаслідок цього фактичний ступінь насичення сушильного агента зменшується [5].

Для кількісної характеристики енергетичної ефективності процесу сушіння використовується універсальний для різних типів сушильного обладнання показник – питомі енерговитрати на випаровування 1 кг вологи або на обробку 1 кг зерна. Цей критерій визначається за наступним співвідношенням [8]:

$$q_0 = \frac{c_p \cdot (t_1 - t_0)}{(d_2 - d_1) \cdot 10^{-3}} = \frac{I_1 - I_0}{(d_2 - d_1) \cdot 10^{-3}}, \quad (2.7)$$

де I_1 та I_0 – ентальпія сушильного агента відповідно на вході до сушарки та на вході до теплогенератора.

Величина $\Delta d = d_2 - d_1$, рівняння (2.7), яка розміщена в знаменнику, показує яка випаровується маса вологи. Враховуючи, що процес відрізняється від ізобарного, кількість випарованої вологи може бути визначена за формулою [8]:

$$\Delta d = \frac{c_p \cdot (t_1 - t_2) - \sum Q_{\text{втр}}}{3,01 + 5,51 \cdot (t_1 + t_2 + 546) \cdot 10^{-5} + r_1}, \quad (2.8)$$

де параметри враховують фактичні умови r_1 проходження сушильного агенту через зернову масу та теплові втрати $\sum Q_{\text{втр}}$, що виникають у процесі.

Кількість вологи, що випаровується під час сушіння, може бути визначена також на основі масового балансного рівняння:

$$G_{\text{в}} = G_{\text{п}} (d_2 - d_1), \quad (2.9)$$

де $G_{\text{в}}$ – маса вологи, що видаляється з матеріалу, кг/с;

$G_{\text{п}}$ – витрата сушильного агента, кг/с;

d_1 та d_2 – вологовміст повітря на вході та виході із сушарки, кг/кг сухого повітря.

Балансне рівняння дозволяє врахувати фактичну кількість води, що переходить у пару, і є основою для розрахунку енергетичних витрат сушильного процесу.

Порівнюючи знайдені значення Δd з (2.8) одержимо, що для теоретичної сушарки $\sum Q_{\text{втр}} = 0$:

$$t_1 - t_2 = \frac{G_0}{L \rho} \cdot \frac{dU}{d\tau} 10^{-3} \cdot \frac{1}{c_p} \cdot f(t, r). \quad (2.10)$$

Якщо підставити значення (2.11) у (2.6), дістанемо:

$$\eta = \frac{G_0 \cdot \frac{dU}{d\tau} 10^{-3} \cdot f(t, r)}{L \cdot \rho_{\text{CA}} \cdot c_p \cdot (t_1 - t_0)}. \quad (2.11)$$

При цьому зважаючи на те, що $L = S \cdot V_{\text{CA}}$, дістанемо формулу визначення ККД зерносушарки:

$$\eta = \frac{G_0 \cdot I \cdot f(t, r) 10^{-3}}{S \cdot V_{\text{CA}} \cdot \rho_{\text{CA}} \cdot c_p \cdot (t_1 - t_0)}, \quad (2.12)$$

$$\text{де } I - \text{ швидкість видалення вологи, кг/год; } \quad I = \frac{dU}{dt} \quad (2.13)$$

$$f(t, r) = \frac{r}{G}, \quad \text{– питомі затрати тепла:} \quad (2.14)$$

де G – продуктивність по вологому зерну, кг/год.

V_{CA} – швидкість руху агента в сушці, м/с.

Отже, енергетична ефективність зерносушарки визначається режимними параметрами сушильного процесу, зокрема температурою та швидкістю сушильного агента, інтенсивністю видалення вологи та часом експозиції. Останні два показники залежать від виду зерна, його початкової вологості, способу сушіння, конструкції сушарки та інших технологічних факторів.

Проблему зниження енергоємності та одночасного підвищення якості процесу сушіння можна вирішувати шляхом удосконалення технології сушіння, як у існуючих, так і в розроблюваних зерносушарках. Це передбачає оптимізацію режимів сушіння та застосування раціональних технологічних регламентів.

Основним завданням підвищення технологічної ефективності є збільшення продуктивності зерносушарки та покращення якісних характеристик готового продукту. Серед перспективних напрямів інтенсифікації видалення вологи при одночасному зниженні питомих енерговитрат та підвищенні якості зерна виділяють використання вібраційних сушарок, у яких сушильним агентом є суміш підігрітого повітря та озону певної концентрації.

У таких установках зерно піддається вібраційному впливу, що забезпечує постійне оновлення його поверхні, інтенсифікує процес сушіння та підвищує рівномірність обробки. Озоноповітряна суміш, в свою чергу, сприяє ефективному видаленню як вільної, так і зв'язаної вологи з зерна.

Для повного використання переваг комбінованих вібраційних та озонуючих технологій необхідне детальне дослідження їхнього впливу на параметри сушильного процесу, а також на енергетичні та технологічні

показники. Такі дані можуть бути отримані за допомогою математичного моделювання та експериментальних досліджень.

2.3 Моделювання основних параметрів віброозонуючого сушіння

Для забезпечення необхідного віброзв'язаного стану зернової сировини під час сушіння необхідно розглянути особливості роботи різних типів коливних систем.

Вібраційні процеси в сушарках зерна можна класифікувати за механізмом виникнення коливань: авто-, вимушені та параметричні коливання. Кожен тип має власні особливості, що визначають ефективність сушильного процесу та енергетичні витрати.

Автоколивальні системи виникають внаслідок компенсації енергетичних втрат системи за рахунок автоматичного підведення енергії від внутрішніх або нестатичних джерел.

У системах з м'яким самозбудженням стан рівноваги нестійкий і порушується самотійно, без зовнішнього впливу.

У системах з жорстким самозбудженням коливальний рух ініціюється лише під дією зовнішнього джерела енергії. Після його відключення система зупиняється у межах області нестійкого стану, що забезпечує повторне самотійне виникнення коливань при наступному включенні енергопостачання.

Автоколивання ефективні за умов невеликого енергетичного розсіювання, оскільки вони близько збігаються з однією з власних мод коливань системи. На відміну від вільних коливань, вони не затухають, а від вимушених і параметричних – характеризуються самозбудженням, тобто процес коливань визначається внутрішніми властивостями системи.

Вимушені коливання виникають під дією зовнішніх змушуючих сил, параметри яких періодично змінюються. Коливання відбуваються з частотою змушуючої сили та підтримуються за рахунок постійного підведення енергії.

Більшість сучасних вібраційних машин працює саме у режимі вимушених коливань, що дозволяє регулювати амплітудні та фазові характеристики

вібрацій у широкому діапазоні та забезпечує роботу у різних резонансних режимах: звичайний резонанс; супергармонійний резонанс; комбінаційний резонанс; субгармонійний режим.

Змушуюча дія віброзбуджувача створює незрівноважену коливну систему і може мати вигляд сили (P) або моменту (M).

Залежно від технологічних вимог, змушуюча дія може бути одно-, дво- або тривимірною; за характером впливу – коловою, еліптичною або спрямованою.

У випадку спрямованої вібрації вектор силового параметра має незмінний напрямок і амплітуду.

У разі колової вібрації вектор обертається рівномірно, зберігаючи постійну амплітуду.

Важливо враховувати, що спрямований або коловий силовий параметр не завжди викликає відповідно спрямовану або колову вібрацію точок робочого органу.

Використання віброзбуджених систем у зерносушарках забезпечує:

- інтенсифікацію видалення вологи за рахунок постійного оновлення поверхні зерна;
- зменшення часу сушіння і підвищення однорідності вологості зернової маси;
- підвищення енергетичної ефективності процесу шляхом оптимізації режимів вібрації;
- можливість комбінування різних типів коливань для досягнення необхідного режиму сушіння залежно від виду зерна та його вологості.

Таким чином, комплексне використання авто-, вимушених та параметричних коливань дозволяє досягти високої продуктивності та якості сушіння зерна при мінімальних енерговитратах.

2.4 Теоретичні обґрунтування енергетичного балансу коливальної системи

Енергетичний баланс коливальної системи описується рівнянням балансу потужності:

$$N_k = N_0 - [N_{вс} + N_{вр} + N_{мех} + N_{дод}], \quad (2.15)$$

де N_0 - потужність, що надходить із електромережі, кВт;

$N_{вс}$, $N_{вр}$ - втрати потужності в статорі та роторі відповідно, кВт;

$N_{мех}$ - механічні втрати енергії, кВт;

$N_{дод} = 0,005 N_0$ — додаткові енергетичні витрати, кВт.

Потужність, що надходить із електромережі до електродвигуна, визначається за формулою:

$$N_0 = 3 U I \cos \psi, \quad (2.16)$$

де U - напруга, В;

I - сила струму, А;

$\cos \psi$ - коефіцієнт потужності.

Коефіцієнт потужності залежить від завантаження двигуна. Для асинхронних електродвигунів його можна приймати у межах:

- на холостому ході: $\cos \psi_h = 0,1-0,25$,

- при номінальному завантаженні: $\cos \psi_n = 0,75-0,93$.

Коефіцієнт завантаження визначає співвідношення між фактичним навантаженням двигуна та його номінальною потужністю та використовується для більш точного визначення реальної енергоспоживаної потужності.

$$\beta = \frac{M_{оп}}{M_{кр}}, \quad (2.17)$$

де $M_{оп}$ - момент опору системи, Н·м;

$M_{кр}$ - крутний момент на валові двигуна, Н·м.

Коефіцієнт корисної дії віброприводу залежить від рівня завантаження і може бути визначений за співвідношенням:

$$\eta = \frac{N_k}{N}. \quad (2.18)$$

де η - ККД віброприводу у відсотках.

Цей показник дозволяє оцінити ефективність передачі енергії від електродвигуна до коливальної системи та визначити втрати енергії в механічних компонентах приводу.

Номінальне значення коефіцієнта корисної дії віброприводу відповідає коефіцієнту завантаження ($\beta = 1$).

Таким чином, серед основних енергетичних параметрів вібрації можна виділити: складові енергетичного балансу; роботу внутрішніх та зовнішніх сил коливальної системи; питомі енергетичні характеристики, що відносяться до одиниці коливної маси віброприводу та одиниці маси продукції [12].

Під час експлуатації віброустановки в опорних вузлах приводного валу виникають сили тертя, які зумовлюють додаткові втрати енергії через значні навантаження на підшипникові вузли. Сила тертя визначається за залежністю:

$$F_{\text{тер}} = f N, \quad (2.19)$$

де f - коефіцієнт тертя, $f = 0,005-0,008$ [12]

N - нормальна сила, що діє на контактні поверхні.

Цей показник дозволяє оцінити додаткові енергетичні втрати та коригувати розрахунки потужності приводу для забезпечення ефективної роботи віброприводу.

Величину сил тертя у вузлах опори можна записати у вигляді:

$$F_{\text{тер}} = M_{\text{тер}} \cdot \omega_1 = 1/2 \cdot f \cdot F \cdot d_y, \quad (2.20)$$

де d_y - діаметр цапфи для посадки підшипника, м;

$M_{\text{тер}}$ - момент сил тертя, Н·м.

$$M_{\text{тер}} = \frac{1}{2} F_{\text{тер}} d_y \quad (2.21)$$

Враховуючи сили тертя, необхідну потужність електродвигуна можна визначити за формулою [14]:

$$N_{\text{пр}} = \frac{1}{\eta} [N_{F_{\text{max}}} + N_{\text{тер}}] \quad (2.22)$$

де $N_{F_{\text{max}}}$ – вимушена потужність, силою, кВт;

$$N_{F_{\text{max}}} = m_{\text{д}} A \omega^2; \quad (2.23)$$

$N_{\text{тер}}$ - потужність, витрачена на подолання сил тертя.

Це дозволяє точно розрахувати потужність приводу віброприводу та врахувати енергетичні втрати у підшипникових вузлах, що необхідно для забезпечення стабільної та ефективної роботи системи.

Використавши залежності (2.22) та (2.23) дістанемо:

$$N_{np} = \frac{1}{\eta} m_o \cdot A \cdot \omega^2 (1 + 0,5d_y \cdot \omega \cdot f). \quad (2.24)$$

Таким чином, необхідна потужність електродвигуна у значній мірі визначається амплітудою коливань сушильної камери, кутовою швидкістю дизбалансного вала і коефіцієнтом корисної дії (ККД) віброприводу.

Цей зв'язок дозволяє враховувати ключові параметри коливальної системи при проектуванні та експлуатації вібраційних сушарок, забезпечуючи ефективність процесу сушіння та оптимізацію енергоспоживання.

2.5 Енергофізичні та термодинамічні процеси в електроозонаторі

Розрядний проміжок електроозонатора розглядається як система, яка сприймає енергію і використовує її для виконання різних видів робіт, зокрема:

$$dW_E = \Sigma dA_i. \quad (2.25)$$

Так, як енергія у відповідності до процесів які проходять перед запалювання розряду тратиться на заряд електричного поля, її можна представити у вигляді:

$$dW_{E0} = dA_{EP}, \quad (2.26)$$

де dW_{E0} - енергія, яка тратиться на запалення розряду.

Роботу електричного поля також можна розглядати як енергетичні втрати на подолання діелектричних перешкод. Після ініціації розряду змінюється характер процесів у розрядному проміжку. Згідно з сучасними уявленнями, озон утворюється у газовому середовищі, що містить кисень, в умовах, коли молекули кисню дисоціюють на атоми [15]. У конкретному випадку дисоціація відбувається внаслідок зіткнень молекул кисню з частинками, прискореними в електричному полі.

При цьому, перешкодний розряд супроводжується: виділенням теплоти, виконанням роботи на подолання діелектричних перешкод, випромінюванням світла широкого спектра та утворенням озону, при цьому:

$$dW_{Ep} = \sum dA_i = dA_{EP} + dA_{Дис} + dA_{C\delta} + dA_T, \quad (2.27)$$

де W_{Ep} - енергія, що тратиться електроозонатором у режимі розряду;

A_T - робота, направлена на нагрів газового середовища;

A_{EP} - робота, витрачена на створення електричного поля;

$A_{C\delta}$ - енергетичні втрати на світлове випромінювання;

$A_{Дис}$ - робота розпаду молекул кисню на атоми.

З моменту ініціації розряду значно зростають втрати енергії, які перевищують енергію, необхідну для розпаду кисню [14]. Теоретично мінімальна витрата енергії на виробництво 1 кг озону становить 0,83 кВт·год /кг [17], тоді як у реальних електроозонаторах цей показник сягає 15–30 кВт·год/кг [18].

Отже, після запалювання розряду основним енергетичним процесом, що споживає більшість електроенергії, є нагрівання газового середовища, яке складає понад 70 % загальних витрат електроенергії [19]. Високі температури негативно впливають на продуктивність електроозонатора, прискорюючи руйнування нещодавно утворених молекул озону [20].

Критичний рівень нагріву електроозонатора супроводжується збільшенням споживаної потужності та різким зниженням продуктивності генерації озону.

Конструкції озонаторів, призначених для обробки зернової сировини, зазвичай не передбачають систем активного охолодження електродів, оскільки це значно збільшує вартість апарату, його масогабаритні показники та потребує залучення додаткового обслуговуючого персоналу. Тому запобігання перегріву здійснюють шляхом регулювання напруги живлення та частоти електричного струму.

З підвищенням температури різко зростає швидкість тримолекулярних реакцій, що призводить до розкладання озону. При цьому швидкість дисоціації кисню практично не залежить від температури, а швидкість тримолекулярної

реакції може навіть дещо зменшуватися. Такі явища спричиняють суттєве падіння концентрації озону на виході та призводять до нестабільності роботи електроозонатора. Крім того, підвищення температури збільшує ймовірність пробою бар'єрів, тому експлуатація бар'єрного електроозонатора вище критичної температури є недопустимою.

Процес нагріву електроозонатора розглядається за наступних спрощуючих припущень:

1. Пристрій розглядається як суцільне однорідне тіло з практично нескінченною теплопровідністю;
2. Тепловіддача в навколишнє середовище пропорційна різниці температур між електроозонатором та навколишнім середовищем;
3. Температура навколишнього середовища вважається сталою;
4. Теплові втрати, теплоємність електроозонатора та коефіцієнт тепловіддачі не залежать від температури самого пристрою.

За цих умов процеси нагрівання і охолодження електроозонатора можна описати наступним диференціальним рівнянням:

$$A_t \cdot \tau + \frac{C_t d\tau}{dt} = \Delta P_m, \quad (2.28)$$

де τ - перевищення температури, тобто різниця між температурами електроозонатора та температурою НС, °С;

ΔP_t - потужність втрат тепла, Вт;

A_t - коефіцієнт тепловіддачі (теплота, яка виходить в навколишнє середовище за 1 с за підвищеної температури на 1 °С), Дж/(°С·с) або Вт/К;

C_t - теплоємність електроозонатора, Дж/К, яка визначається як:

$$C_t = c_{рп} m_{рп}, \quad (2.29)$$

де $c_{рп}$ - питома теплоємність розрядного пристрою, Дж/(кг·К);

$m_{рп}$ - маса розрядного пристрою, кг.

Перевищення температури електроозонатора під час нагрівання або охолодження при постійній тепловій потужності ($\Delta P_t = \text{const}$) змінюється за експоненціальним законом з певним часом нагрівання (постійною часу):

$$T_H = C_t / A_t, \quad (2.30)$$

З рівняння випливає, що частина енергії, що виділяється в електроозонаторі з моменту його включення, використовується на нагрів самого розрядного пристрою, тоді як решта енергії розсіюється через поверхню пристрою або відводиться повітряним потоком, що проходить через розрядний проміжок, у навколишнє середовище.

У такому випадку постійну часу нагрівання розрядного блоку електроозонатора можна визначити за формулою:

$$T_H = C_t / \omega_t \cdot \theta_v, \quad (2.31)$$

де $\omega_t = 0,278 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$ – коефіцієнт теплопередачі;

θ_v – кількість тепла, що транспортується потоком повітря:

$$\theta_v = V \cdot \rho c (t_n - t_k), \quad (2.32)$$

де V - об'єм повітря, яке передається через робочу камеру озонатора, м^3 ;

ρ - густина повітря за нормальних умов, $\rho = 1,223 \text{ кг}/\text{м}^3$;

t_n - температура навколишнього середовища, $^\circ\text{С}$;

t_k - кінцева температура теплоносія, $^\circ\text{С}$.

У процесі нагрівання електроозонатора температура його поверхні поступово зростає, при цьому дедалі більша частина тепла передається у навколишнє середовище, і нагрів пристрою поступово стабілізується. При тривалій експлуатації ($t = \infty$) в умовах незмінного режиму встановлюється теплова рівновага: всі внутрішні енергетичні втрати розсіюються в навколишнє середовище, а нагрівання електроозонатора припиняється ($d(\Delta T) = 0$).

Такий стан називають сталим тепловим режимом, який характеризується сталою температурою електроозонатора ($\Delta t_{\text{ст}} = \text{const}$).

При цьому стале перевищення температури можна визначити за формулою:

$$\Delta t_{\text{cm}} = \frac{\mu P_m}{\omega_m \theta_v}. \quad (2.33)$$

Загальним розв'язком виразу (2.33) буде:

$$\Delta t = \Delta t_0 + (\Delta t_\infty - \Delta t_0) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_n}} \right), \quad (2.34)$$

де Δt_0 - початкове перевищення температури поверхні розрядного пристрою озонатора над температурою НС при ($t = 0$), °С;

Δt_∞ - кінцеве перевищення температури поверхні розрядного пристрою над температурою НС при ($t = \infty$), °С;

T_n - стала часу нагрівання, °С.

В окремому випадку, коли розрядний пристрій озонатора нагрівається з практично холодного стану $t = 0$: $\Delta t_0 = 0$, $t = \infty$; $\Delta t_\infty = \Delta t_{ct}$, маємо:

$$\Delta t = \Delta t_{cm} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_n}} \right). \quad (2.35)$$

Вибір оптимального режиму роботи електроозонатора слід здійснювати з урахуванням умови забезпечення безпечного теплового стану пристрою під час експлуатації:

$$t_{НС} + t_{max} = t_{кр}, \quad (2.36)$$

де $t_{кр}$ - допустима температура електроозонатора, визначена критичною температурою, при якій починається інтенсивна термічна деструкція озону.

Для розрахунків приймають ($t_{кр} = 70$ °С), при якій різко зростає швидкість небажаних термічних реакцій, що знижують ефективність генерації озону.

У розрядному проміжку основним елементом, який піддається нагріванню, є діелектричні перешкоди, через які проходить перешкодний розряд. Температура цих перешкод складно залежить від кількості потужності, що розсіюється на розрядному пристрої, від ефективності тепловіддачі, а також від температури вхідного газу з навколишнього середовища. Це можна виразити у вигляді функціональної залежності:

$$T_{бар} = f(P_{розс}, A_t, T_{вх}), \quad (2.37)$$

де $T_{бар}$ - температура діелектричних бар'єрів, °С;

$P_{розс}$ - потужність, що розсіюється на розрядному пристрої, Вт;

A_t - коефіцієнт тепловіддачі, Вт/К;

$T_{вх}$ - температура газового середовища на вході, °С.

Розв'язком рівняння теплового балансу для розрядного проміжку електроозонатора є функція, яка описує зміну температури діелектричних

бар'єрів у часі, враховуючи надходження енергії, теплові втрати та тепловіддачу:

$$t_{дБ} = t_{НС} + \frac{\mu P_{py}}{\omega_m \theta_v} \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{T_n}} \right), \quad (2.38)$$

Цей розв'язок дозволяє кількісно оцінити динаміку нагріву та прогнозувати встановлення сталого теплового режиму розрядного проміжку електроозонатора.

Висновок до другого розділу

У другому розділі проаналізовано особливості формування енергетичних та теплових процесів у розрядному проміжку електроозонатора та встановлено їх ключову роль у забезпеченні стабільності озонування. Показано, що найбільша частина споживаної енергії переходить у тепло, що спричиняє інтенсивний нагрів діелектричних бар'єрів і суттєво впливає на розпад отриманого озону.

На основі рівняння теплового балансу описано закономірності зміни температури розрядного пристрою та визначено умови досягнення ним сталого теплового стану. Встановлено гранично допустиме значення температури (70 °С), перевищення якого призводить до пришвидшеної термічної деструкції озону та зниження продуктивності озонатора. Це дозволило визначити вимоги до вибору раціональних режимів роботи, що гарантують стабільність технологічного процесу.

Отримані результати формують теоретичне підґрунтя для подальшого вдосконалення конструкції та підвищення енергоефективності електроозонаторів.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Загальна характеристика експериментальної установки

Експериментальна установка, розроблена для дослідження процесів сушіння та озонування зернової сировини, являє собою багатофункціональний комплекс, який забезпечує створення контрольованих умов для відтворення технологічних режимів, характерних для реальних виробничих сушарок. Конструкцію стенда спроектовано таким чином, щоб забезпечити можливість регулювання параметрів повітряного потоку, концентрації озону, температурних характеристик та інтенсивності вібраційного впливу на матеріал.

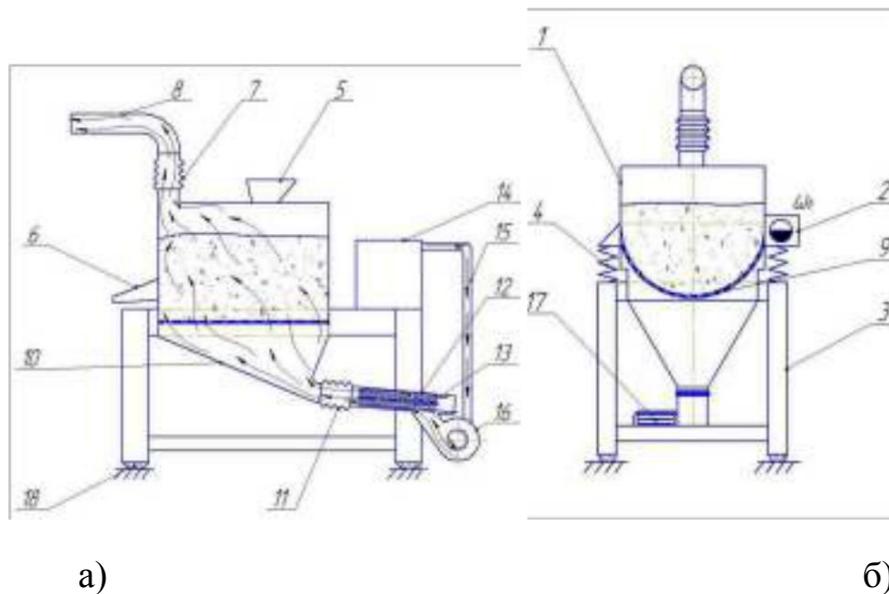


Рисунок 3.1 – Конструктивна схема віброозонуючого комплексу періодичної дії для сушіння зернової сировини

а – вигляд спереду; *б* – вигляд збоку; 1 – U-подібна камера; 2 – вібратор; 3 – рама; 4 – пружини; 5 – завантажувальний лоток; 6 – розвантажувальний лоток; 7, 11 – еластичні з'єднання; 8 – повітропровід для виведення відпрацьованого сушильного агенту; 9 – перфороване днище; 10 – піддон; 12 – повітропровід для подачі сушильного агенту; 13 – електричні нагрівальні елементи; 14 – озонатор; 15 – повітропровід для подачі озоноповітряної суміші; 16 – вентилятор; 17 – електродвигун; 18 – гумові опори

Основним елементом установки є сушильна камера, до якої подається підготовлений сушильний агент. Камера виконана з термостійких матеріалів та обладнана оглядовими вікнами, що дозволяє контролювати поведінку зерна протягом процесу обробки. Її внутрішній простір розділено на зони, у яких відбуваються нагрівання, масообмінні процеси та очищення продукту від вологи.

Підвід сушильного агента здійснюється через повітропровід, оснащений фільтрами, які забезпечують стабільність параметрів потоку. У специфікованих режимах у повітряно-теплову суміш вводиться озон, що генерується окремим блоком електроозонатором бар'єрного типу. Цей вузол дає змогу одержувати озон у концентраціях, необхідних для обробки зернової маси, при цьому параметри генерації регулюються за допомогою електронного модуля керування.

Для рівномірного переміщення зерна та запобігання утворенню застійних зон застосовано вібраційний механізм. Робочий орган, який здійснює передачу коливань, створює умови для інтенсивнішого перемішування частинок, що сприяє прискоренню процесів тепломасообміну. Характеристики вібрації - амплітуда, частота, напрямок - можуть змінюватися залежно від вимог експерименту.

Температура сушильного агента контролюється за допомогою електричного нагрівача, робота якого забезпечує сталий температурний режим у межах необхідних значень. Система управління дозволяє підтримувати параметри з високою точністю, що є критично важливим для відтворення реальних промислових умов.

Для реєстрації основних параметрів процесу використовується комплекс датчиків: температурні перетворювачі, анемометри, озонметри, а також пристрої для контролю вологості та маси зернового матеріалу. Отримані експериментальні дані подаються до комп'ютерного блока, де здійснюється їх обробка, зберігання та візуалізація.

Загалом, експериментальна установка є універсальним інструментом для дослідження впливу параметрів сушіння та озонування на стан зерна. Вона

дозволяє моделювати технологічні процеси з високим ступенем точності, що забезпечує достовірність і повторюваність отриманих результатів.

3.2 Принцип роботи та конструктивні особливості експериментальної установки

Експериментальна установка, призначена для дослідження процесів сушіння та озонування зернових матеріалів, функціонує на основі поєднання кількох взаємопов'язаних технологічних потоків: теплового, повітряного, вібраційного та озонowego. Її конструкція передбачає можливість керування основними параметрами цих потоків, що дозволяє моделювати різні режими обробки зерна та аналізувати їх вплив на інтенсивність масообмінних процесів.

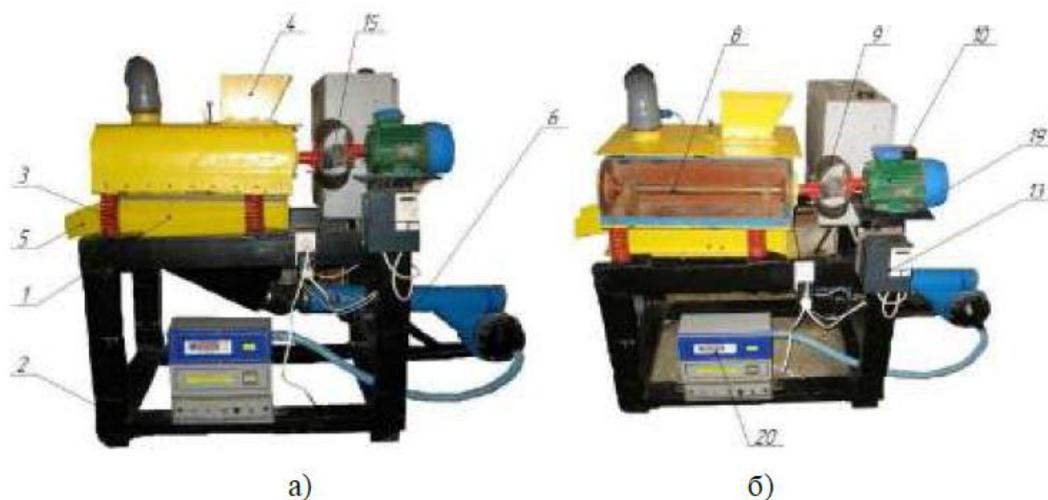


Рисунок 3.2 – Дослідна модель віброозонуючого комплексу

У загальному вигляді робота системи відбувається за такою послідовністю. Спочатку повітря з навколишнього середовища надходить до фільтраційного блоку, де видаляються механічні домішки. Далі очищене повітря направляється у нагрівальний модуль, в якому за допомогою електричного теплогенератора забезпечується доведення його температури до заданого рівня. Температурні датчики здійснюють безперервний контроль у режимі реального часу, що дає можливість стабілізувати параметри сушильного агента.

Перед подачею до сушильної камери тепловий потік може збагачуватися озоном, який виробляється електроозонатором бар'єрного типу. Його робоча частина представляє собою систему коаксіально розташованих електродів, між якими формується бар'єрний розряд. У газовому середовищі, що містить кисень, під дією електричного поля відбувається дисоціація молекулярного кисню та утворення озону. Концентрація озону регулюється шляхом зміни вхідної напруги, частоти струму та величини зазору в розрядному проміжку.

Сушильна камера є ключовим елементом конструкції установки. Вона обладнана вібраційним приводом, який забезпечує періодичні або безперервні коливання робочого органу, що підтримують зернову масу у псевдозваженому або квазірухомому стані. Такий режим сприяє постійному оновленню поверхні контакту між зернами та повітряним потоком, що значно інтенсифікує процеси тепломасоперенесення.

Конструктивно камера оснащена системою рівномірного розподілу сушильного агента. Повітряно-озонова суміш надходить у нижню частину сушильної камери через перфорований розподільник, який забезпечує формування спрямованого та однорідного повітряного потоку. Під дією вібрації частинки зерна рівномірно переміщуються вздовж поверхні камери, не утворюючи «мертвих зон», що є критично важливим для рівномірного сушіння.

Відпрацьована повітряно-озонова суміш відводиться через систему вентиляції, де озон руйнується каталітичним нейтралізатором, що гарантує безпечну експлуатацію установки.

Комплекс вимірювальних приладів забезпечує контроль таких параметрів, як: температура сушильного агента; швидкість повітряного потоку; концентрація озону; частота та амплітуда коливань; вологість зернової сировини на вході та виході із сушильної камери.

Для аналізу температурного полюса в середині камери встановлені додаткові точки вимірювання, що дозволяє оцінювати рівномірність прогрівання зерна та виявляти можливі зони локального перегріву.

Взаємодія всіх компонентів системи координується за допомогою електронного блока управління, який забезпечує стабільність заданих

параметрів та можливість оперативного коригування режиму. Поєднання вібраційного впливу та озонування створює передумови для прискорення дегідратації зерна, одночасного знезараження поверхні та зниження загального енергоспоживання процесу.

Таким чином, конструктивне виконання експериментальної установки дозволяє відтворити широкий спектр режимів сушіння й озонування та забезпечує якісне проведення експериментальних досліджень із високою точністю та повторюваністю.

3.3. Методика проведення експериментальних досліджень

Метою експериментальних досліджень є визначення впливу параметрів сушіння та озонування на зміни стану зернової сировини, а також встановлення оптимальних умов, що забезпечують інтенсифікацію масообмінних процесів та підвищення енергетичної ефективності. Методика проведення дослідів базується на стандартизованих підходах до вивчення кінетики сушіння, а також на сучасних вимогах до аналізу ефективності озонної обробки зернових культур.

Перед початком досліджень підготовку експериментальної установки здійснювали у відповідності до технічних вимог. Зерно очищували від механічних домішок і відбирали за фракціями згідно з масою та розміром. Це забезпечувало однорідність дослідної партії й виключало похибки, пов'язані з різною структурою матеріалу. Початкова вологість зерна визначалась гравіметричним методом відповідно до чинного державного стандарту.

Експеримент проводився за схемою поетапного варіювання технологічних параметрів. Зокрема, змінювали:

- температуру сушильного агента (t_n);
- швидкість подачі повітря (V_n);
- інтенсивність вібраційного впливу (амплітуду та частоту);
- концентрацію озону в повітряно-газовій суміші;
- тривалість обробки.

Кожне дослідження проводили при фіксованих значеннях температури та витрати сушильного агента. Після встановлення необхідного режиму сушарка запускалася на холостому ході для стабілізації температурних та динамічних параметрів. Тільки після цього в сушильну камеру подавали зерновий матеріал порційним або безперервним способом.

Під час сушіння здійснювався контроль ключових показників: температури в різних точках сушильної камери, вологості вхідного та вихідного повітря, швидкості руху повітряного потоку, концентрації озону, а також характеристик вібраційного процесу. Для фіксації даних застосовували систему автоматизованого моніторингу, яка забезпечувала їх реєстрацію з заданою періодичністю.

Вологість зернової маси після кожного етапу сушіння визначалася шляхом відбору проб, які зважувалися до та після термічної обробки у сушильній шафі.

Окрему увагу приділяли впливу озону на процес сушіння. Для цього порівнювали режими із застосуванням озонованої суміші та з традиційним повітряним сушильним агентом. Визначали концентрацію озону на вході та виході, ступінь його розкладання і вплив на прискорення видалення вологи. Також оцінювали санітарно-гігієнічні показники обробленого зерна, що дозволяло встановити потенційну дезінфекційну ефективність озону.

Для всіх серій дослідів проводили багатофакторний аналіз із визначенням статистично значущих впливів кожного параметра. Результати узагальнювали шляхом побудови графіків, залежностей і поверхонь відгуку, які дозволяли встановити оптимальний діапазон роботи сушильної установки.

Таким чином, запропонована методика забезпечує комплексне дослідження тепломасообмінних та окиснювально-дезінфекційних процесів, що відбуваються при одночасному сушінні та озонуванні зернової сировини, та дозволяє визначити параметри, які забезпечують найвищу технологічну ефективність.

3.4 Методика визначення дози обробки зерна озоноповітряною сумішшю

Аналіз наукових джерел, присвячених особливостям будови та властивостей зерна різних сільськогосподарських культур, свідчить, що їх хімічний склад має незначні відмінності. Це дозволяє стверджувати, що реакція зерна на дію озону, незалежно від культури, підпорядковується спільним закономірностям і може бути описана універсальною системою параметрів [5].

Для встановлення необхідної інтенсивності впливу визначимо ефективну дозу озону, що потрібна для обробки 1 кг зерна:

$$D = C V_y, \quad (3.1)$$

$$D = \frac{CVt}{m}. \quad (3.2)$$

де C – концентрація озону в озоноповітряній суміші, мг/м^3 .

Питомий об'єм озоноповітряної суміші, що припадає на 1 кг зерна, визначається за формулою:

$$V_y = V t / m, \quad (3.3)$$

де V – подана кількість повітря, $\text{м}^3/\text{с}$;

t – тривалість озонування, с ;

m – маса зернової проби, кг .

Для зерна кукурудзи та пшениці питомий об'єм озоноповітряної суміші становить у середньому $0,06 \text{ м}^3/\text{кг}$, що забезпечує ефективну дозу озону $1,91 \text{ мг/кг}$ [13].

Розглянемо геометричні характеристики зернин, які впливають на площу контакту з озоноповітряним середовищем. Для кукурудзи середній діаметр становить ($D_1 = 7 \text{ мм}$), а для пшениці – ($D_2 = 3 \text{ мм}$); висота зернини пшениці – ($h = 5 \text{ мм}$). Середня маса 1000 зернин становить відповідно: кукурудза – $m_1 = 300 \text{ г}$, пшениця – $m_2 = 45 \text{ г}$.

Для наближеного розрахунку площі їх поверхні використовуємо спрощені геометричні моделі.

Площа поверхні зернини кукурудзи

Приймаючи зернину кукурудзи у формі сфери:

$$S_1 = 4\pi \cdot R_1^2, \quad (3.4)$$

де R_1 – радіус зернини, мм.

Площа поверхні зернини пшениці

Для зернини пшениці, умовно поданої як циліндр:

$$S_2 = \pi \cdot R_2^2 \cdot h, \quad (3.5)$$

де R_2 – радіус циліндра, мм;

h – висота зернини, мм.

З урахуванням цих залежностей площа поверхні 1000 зернин становить:

– кукурудза: $S_1 = 153,86 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$,

– пшениця: $S_2 = 35,32 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$.

Для врахування співвідношення між масою зерна та його поверхневою площею вводиться коефіцієнт h , який визначає відношення маси однієї зернини до площі її зовнішньої поверхні:

$$\Delta h = \frac{m}{S}. \quad (3.6)$$

Звідси:

– для кукурудзи: $h_1 = 1,95 \text{ кг/м}^2$,

– для пшениці: $h_2 = 1,27 \text{ кг/м}^2$.

Це означає, що на одиницю поверхні зернин кукурудзи припадає більша маса біологічної речовини, ніж у пшениці, а отже, через однакову площу поверхні проходить різна кількість озону для забезпечення еквівалентного технологічного ефекту.

Оскільки ефективність озонування залежить від маси матеріалу, який обробляється через певну площу поверхні, логічно припустити, що співвідношення між величинами h та дозою обробки D повинно бути пропорційним:

$$\delta = \frac{D_1}{D_2} \approx \frac{\Delta h_1}{\Delta h_2} = \frac{m_1 R_2^2}{m_2 R_1^2}, \quad (3.7)$$

де m – маса 1000 зернин,

R – радіус зернини.

Для наведених культур співвідношення становить 1,53, що дає підстави стверджувати: для кожної культури існує коефіцієнт g , пов'язаний з параметром h , який визначає необхідну ефективну дозу озонування:

$$g = \frac{\Delta h_0}{\Delta h_x}. \quad (3.8)$$

Увівши базове значення $\Delta h_0 = 1,0$ кг/м², отримуємо відповідну питому дозу: $D_0 = 1,27$ мг/кг.

Таким чином, для визначення оптимальної дози озонування для будь-якої сільськогосподарської культури можна застосовувати універсальну залежність:

$$D_x = gD_0 = \frac{\Delta h_0}{\Delta h_x} D_0. \quad (3.9)$$

3.5. Обґрунтування раціональних параметрів дослідного віброозонуючого комплексу

На основі результатів проведених експериментів із сушіння зернової сировини у віброозонуючому комплексі було здійснено статистичну обробку показників, що характеризують якість отриманого матеріалу (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 - Результати експериментальних досліджень параметрів сушіння зернової сировини у віброозонуючому комплексі

№ дослідів	Вібро-прискорення a , м/с ²	Температура T_{CA} , °C	Концентрація озону NO ₃ , мг/м ³	Час обробки t_0 , хв	Кінцева вологість W_k , %	Енерговитрати N , кВт·год
1	130	60	12	200	11,1	4,21
2	110	60	12	200	12,7	4,15
3	130	50	12	200	12,1	4
4	110	50	12	200	13,2	3,9
5	130	60	8	200	11,2	3,85
6	110	60	8	200	11,9	3,7
7	130	50	8	200	12,8	3,65
8	110	50	8	200	13	3,5

9	130	60	12	140	14	3,1
10	110	60	12	140	14,4	3,02

Аналіз отриманих даних дав змогу визначити вплив основних технологічних чинників на ефективність процесу та встановити їх раціональні інтервальні значення.

Для комплексної оцінки процесу сушіння як контрольовані параметри було обрано кінцеву вологість зернової сировини W_k , % та енергоспоживання приводу установки N , кВт·год. Ці показники найбільш чутливо реагують на зміну умов обробки та кількісно відображають якість і економічну ефективність роботи комплексу.

На вищезазначені параметри діють чотири ключові фактори, які визначають кінетику процесу:

1. Віброприскорення a , м/с² – інтегральний параметр, що характеризує динамічний режим роботи системи та інтенсивність перемішування зернового шару.

2. Температура сушильного агента T_{CA} , °C – впливає на швидкість випаровування вологи та теплову рівномірність процесу.

3. Концентрація озону NO_3 , мг/м³ – визначає інтенсивність окиснювальної дії на поверхню зернин і сприяє прискоренню вологовіддачі.

4. Тривалість обробки t_0 , хв – один із базових параметрів, що встановлює ступінь досягнення цільових технологічних показників.

У ході аналізу було встановлено, що поєднання цих факторів у певних співвідношеннях впливає на рівномірність сушіння, збереженість структури зерна та енергетичні витрати комплексу. Пошук оптимальних режимів дозволив виділити такі параметри, при яких забезпечується мінімальна кінцева вологість за допустимого рівня енерговитрат і відсутності надмірного механічного навантаження на зерновий матеріал.

$$W_k = f(a, T_{CA}, NO_3, t_0), \quad (3.10)$$

$$N = f(a, T_{CA}, NO_3, t_0), \quad (3.11)$$

де a - віброприскорення, м/с²;

T_{CA} – температура сушильного агента, °C;

NO_3 – концентрація озону, мг/м³;

t_0 – час обробки, хв..

Визначення впливу зазначених факторів на показники досліджуваного процесу за умов проведення однофакторних експериментів потребує значних трудових і часових витрат, а також не забезпечує повної інформації про можливі взаємодії між параметрами. У зв'язку з цим більш раціональним підходом є використання статистичного методу багатфакторного аналізу, зокрема побудова регресійної моделі другого порядку на основі рототабельного центрально-композиційного плану (РЦКП) [9–12].

Застосування РЦКП дозволяє підвищити точність математичного опису процесу завдяки рівномірності розташування експериментальних точок у факторному просторі та введенню «зіркових точок», величина яких визначається спеціальним коефіцієнтом α . Даний підхід забезпечує формування поверхні відгуку, яка максимально коректно відображає залежність вихідних параметрів від зміни факторів та їх взаємодій.

Кількість факторів у розробленому експериментальному плані позначимо через k . Тоді загальна кількість необхідних дослідів за методом РЦКП визначається виразом:

$$N = 2^k + 2k + N_0, \quad (3.12)$$

де 2^k - повний факторний експеримент;

$2k$ - «зіркові» (аксіальні) точки;

N_0 - кількість дослідів у центрі плану, що забезпечують можливість оцінювання дисперсії похибки та підвищують точність регресійної моделі.

Для даного дослідження кількість керованих факторів становить ($k = 4$), а саме:

- * віброприскорення (a),
- * температура сушильного агента (T_{CA}),
- * концентрація озону (NO_3),
- * час обробки (t_0).

Тоді кількість експериментів становитиме:

$$N = 2^4 + 2 \times 4 + N_0 = 16 + 8 + N_0. \quad (3.13)$$

З урахуванням прийнятої кількості центральних дослідів, наприклад ($N_0 = 5$), повна кількість експериментів дорівнює:

$$N = 16 + 8 + 5 = 29. \quad (3.14)$$

Таким чином, застосування РЦКП дозволяє отримати достовірну математичну модель процесу сушіння, врахувати нелінійності та взаємодії факторів, а також оптимізувати кількість експериментальних точок.

Статистичне опрацювання результатів та визначення впливу факторів

Встановлення впливу наведених факторів на показники процесу сушіння зернової сировини за умов проведення окремих однофакторних експериментів є методично складним та вимагає значних трудових витрат. У зв'язку з цим раціональним підходом є використання статистичного моделювання, що дозволяє отримати узагальнену математичну залежність у вигляді рівняння множинної регресії другого порядку. Для цього застосовано метод рототабельного центрально-композиційного планування (РЦКП) багатфакторного експерименту, який рекомендований для дослідження багатовимірних технологічних процесів [9–12].

Методологія РЦКП забезпечує підвищену точність апроксимації експериментальних даних завдяки:

- введенню центральних повторів, що підвищують надійність оцінки дисперсії;
- використанню спеціально підібраного значення так званого «зіркового плеча» α , яке гарантує рототабельність моделі та однакову точність прогнозування в усіх напрямках факторного простору.

Загальна кількість точок плану для РЦКП визначається залежно від кількості досліджуваних факторів k і включає центральні, факторні та зіркові експерименти, що дозволяє сформувати повноцінну вибірку для побудови рівняння регресії другого порядку.

Аналіз статистичних характеристик експериментальних даних показав, що значення коефіцієнтів асиметрії для всіх вибірок наближені до нуля. Це свідчить про те, що розподіл результатів є близьким до симетричного і добре описується нормальним законом розподілу.

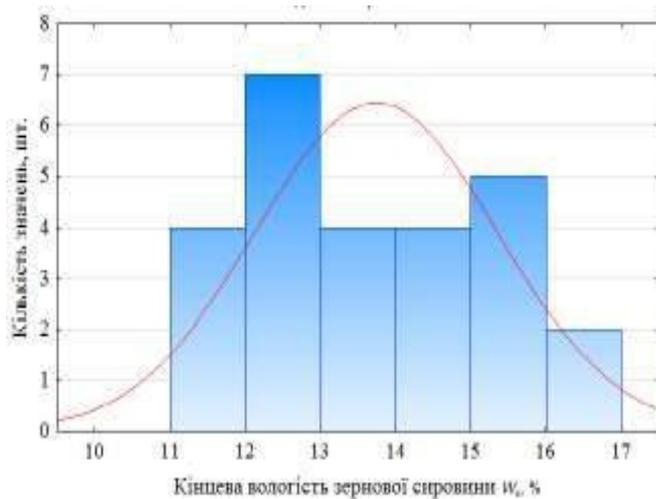
Для подальшого аналізу було визначено інтервали групування вихідних зразків за показниками якості, що дозволило виконати стратифікацію даних та перейти до побудови аналітичної моделі процесу. Узагальнені статистичні параметри подано в таблиці 3.2, а їх графічне відображення - на рисунку 3.3.

Таблиця 3.2 – Статистична характеристика параметрів якості вихідної сировини

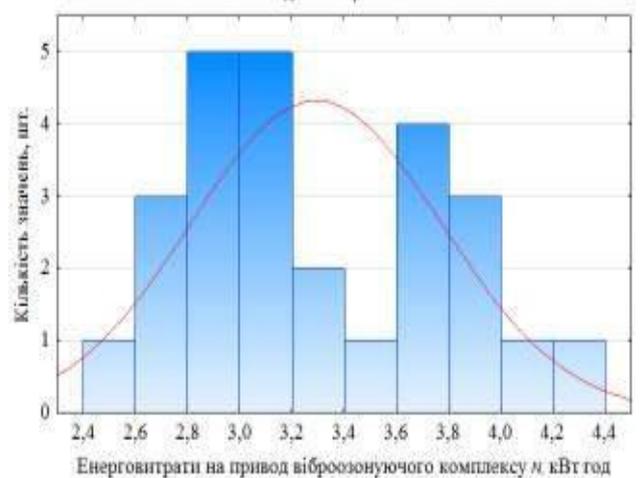
Показник	W _к , %	N, кВт·год
1	2	3
Кількість факторів, шт	26	26
Середнє значення	13,74	3,29
Критерій Граббса	1,71	1,91
Геометричне середнє	13,65	3,25
Гармонічне середнє	13,56	3,22
Медіана	13,9	3,09
Мода	Множина	Множина
Частота моди	2	2
Сума	357,4	85,61
Мінімум	11,1	2,6
Максимум	16,5	4,21
Статистичне відхилення	1,6	0,47
Довірчий інтервал статистичного відхилення -95%	1,26	0,37
Довірчий інтервал статистичного відхилення +95%	2,22	0,66

Діапазони варіювання факторів у функціях та обиралися таким чином, щоб усі передбачені експериментальним планом комбінації могли стабільно реалізовуватися без суперечностей. Для визначення таких областей проведено попередні пошукові експерименти.

Фактори мають різні розмірності та порядки величин, тому для побудови поверхні відгуку застосовано кодування факторів, що є лінійним перетворенням факторного простору [16].



а)



б)

Рисунок 3.3 – гістограма розподілу експериментальних даних якісних параметрів досліджуваного процесу: а – кінцева вологість зернової сировини (W_k), %; б – енерговитрати приводу віброозонуючого комплексу (N), кВт·год.

Рівні факторів у умовному масштабі визначені наступним чином: мінімальний – (-1), середній – 0, максимальний – (+1), а зіркові значення ($-\alpha$) та ($+\alpha$).

Істинні значення факторів матриці РЦКП були встановлені на основі попередніх пошукових експериментів і наведені в таблиці 3.2. Для проведення повнофакторного експерименту РЦКП складено матриці планування експериментів, що представлені у таблиці додатку А.

Метою експерименту є побудова рівняння множинної регресії другого порядку.

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n b_{ij} x_i^2 + \sum_{i=1}^n b_{ij} x_{ij} x_{ij}, \quad (3.15)$$

де y – одна з якісних функцій W, N ;

b_0, b_i, b_{ij} – коефіцієнти регресії, знайдені методом найменших квадратів.

Таблиця 3.3 – Межі групування вихідних значень якісних параметрів експериментальних процесів

Межі групування	Дослідні дані		Нормальний розподіл Передбачуваний	
	Частота	%	Частота	%
за кінцевою вологістю зернового матеріалу				
10<x<=11	0	0	1,14	4,39
11<x<=12	4	15,38	3,61	9,49
12<x<=13	7	26,92	8,35	18,24
13<x<=14	4	15,38	14,62	24,12
14<x<=15	4	15,38	20,33329	21,93
15<x<=16	5	19,23	23,90239	13,72
16<x<=17	2	7,69	25,43861	5,90
По втратах на привод віброозонуючого комплексу				
2,4<x<=2,6	1	3,84	1,93	7,43
2,6<x<=2,8	3	11,53	3,95	7,78
2,8<x<=3,0	5	19,23	7,04	11,86
3,0<x<=3,2	5	19,23	11,00	15,24
3,2<x<=3,4	2	7,69	15,30	16,50
3,4<x<=3,6	1	3,84	19,21	15,06
3,6<x<=3,8	4	15,38	22,22	11,57
3,8<x<=4,0	3	11,53	24,17	7,49
4,0<x<=4,2	1	3,84	25,2	4,08
4,2<x<=4,4	1	3,84	25,72	1,88

Таблиця 3.4 – Рівні факторів та їх інтервали варіювання

Фактори	Рівні факторів					Інтервал варіювання
	- α	-1	0	+1	+ α	

Процес сушіння зернової сировини							
x ₁	– віброприскорення, м/с ²	10	15	20	25	30	5
x ₂	– температура сушильного агента, °С	45	50	55	60	65	5
x ₃	– концентрація озону, мг/м ³	6	8	10	12	14	2
x ₄	– час обробки, хв.	100	130	160	190	220	30

Висновок до третього розділу

У даному розділі розроблено віброозонуючий комплекс для сушіння зернової сировини, який забезпечує одночасний вібраційний вплив на продукт та подачу сушильного агента у вигляді суміші підігрітого повітря та озону певної концентрації.

Визначено методичні підходи та програму досліджень, що включають послідовність теоретичних і експериментальних процедур для встановлення оптимальних технологічних режимів та раціональних параметрів роботи розробленого обладнання з урахуванням комплексного впливу зазначених процесів.

РОЗДІЛ 4

ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ РОЗРОБЛЕНОГО ВІБРООЗОНУЮЧОГО КОМПЛЕКСУ

4.1 Характеристика динамічних параметрів розробленого віброозонуючого комплексу

Експериментальні дослідження проведено на зерні озимої пшениці як об'єкті обробки. Вимірювання технологічних та якісних показників виконувалися відповідно до методики, описаної у розділі 3.

Для визначення динамічних параметрів комплексу були проведені серії експериментів із різними рівнями віброприскорення. Аналіз отриманих даних показав залежності кінцевої вологості зерна (W_k) та енерговитрат (N) від величини віброприскорення (a). Результати експериментів дозволяють встановити оптимальні значення віброприскорення, при яких досягається мінімальна кінцева вологість зерна за одночасно помірних енерговитрат.

Виявлено, що підвищення віброприскорення сприяє більш інтенсивному видаленню вологи з зерна, проте при перевищенні певного рівня спостерігається зростання енерговитрат без суттєвого покращення якості продукту. Ці закономірності дозволяють визначити раціональні технологічні параметри роботи віброозонуючого комплексу, що забезпечують баланс між ефективністю сушіння та економічністю енергоспоживання.

Таким чином, проведені експерименти та обробка отриманих даних дозволяють обґрунтувати оптимальні динамічні режими роботи комплексу та слугують основою для подальшого проектування та налаштування обладнання для сушіння зернової сировини.

На рис. 4.1 наведено експериментальну залежність амплітуди коливань сушильної камери від кутової швидкості обертання дебалансного валу за змушуючої сили ($F = 2,95$ кН). Аналіз кривої показує, що зі збільшенням кутової швидкості (ω) амплітуда коливань (A) проходить три характерні ділянки:

1. Дорезонансна – поступове збільшення амплітуди до 2,5 мм у діапазоні ($\omega = 0-30$) рад/с;

2. Резонансна – досягнення максимальної амплітуди ($A = 7$) мм при ($\omega = 30-65$) рад/с;

3. Післярезонансна – стабілізація амплітуди коливань у межах 2,2–2,5 мм.

Зі зростанням навантаженості робочої камери пікові значення амплітуди в резонансній зоні знижуються через посилення дисипативних сил технологічного середовища.

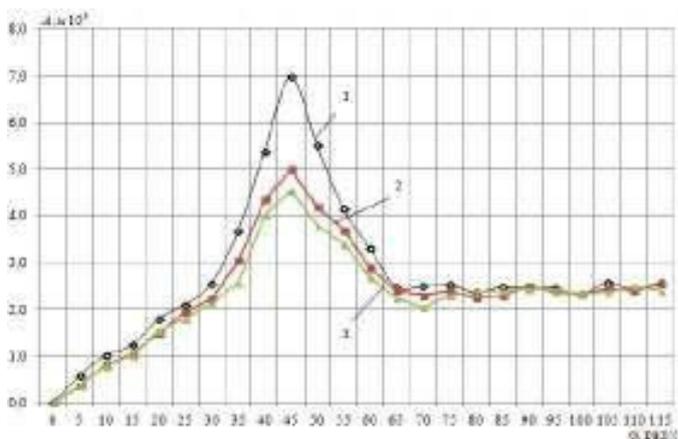


Рисунок 4.1 – Залежність амплітуди коливань сушильної камери від кутової швидкості обертання дебалансного валу:

1 – без навантаження;

2 – 50 % навантаження;

3 – 75 % навантаження.

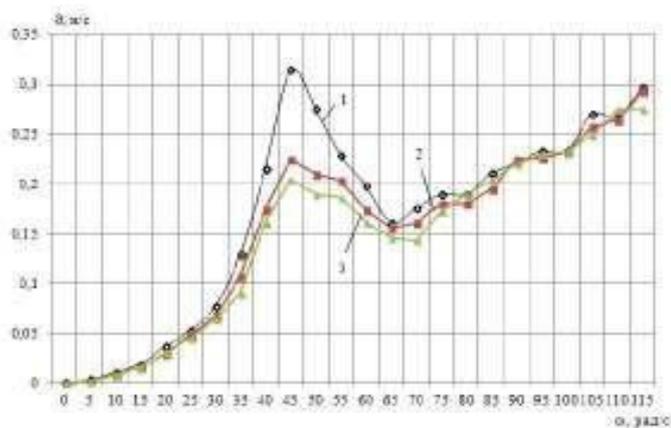


Рисунок 4.2 – Залежність віброшвидкості сушильної камери від кутової швидкості обертання дебалансного валу:

1 – без навантаження;

2 – 50 % навантаження;

3 – 75 % навантаження.

віброозонуючого комплексу від кутової швидкості обертання дебалансного валу (рис. 4.2) показав, що пікові значення досягають 320 мм/с, що відповідає явищу резонансу при ($\omega = 46-48$ рад/с). Після резонансного піку залежність набуває практично лінійного характеру зростання, досягаючи 280 мм/с у експлуатаційному режимі роботи.

Додатково встановлено експериментальні залежності віброприскорення та віброінтенсивності сушильної камери від кутової швидкості обертання дебалансного валу, які представлені на рис. 4.3 та 4.4.



*Рисунок 4.4 – Залежність
віброінтенсивності сушильної камери
від кутової швидкості обертання
дебалансного валу:*

1 – без завантаження;

2 – 50 % завантаження;

3 – 75 % завантаження.

Експериментальні дослідження камери віброозонуючого комплексу показали, що амплітуда коливань, віброшвидкість, віброприскорення та віброінтенсивність суттєво залежать від кутової швидкості обертання дебалансного валу та ступеня технологічного завантаження. Аналіз графічних залежностей (рис. 4.1–4.4) дозволив виділити характерні ділянки дорезонансного, резонансного та післярезонансного режимів, причому пікові значення динамічних параметрів спостерігаються при ($\omega = 46\text{--}48$ рад/с), що відповідає явищу резонансу.

Після досягнення резонансного піку залежності набувають практично лінійного характеру зростання. Встановлено, що збільшення ступеня завантаження робочої камери призводить до зниження пікових значень амплітуди коливань у резонансній зоні через посилення дисипативних ефектів технологічного середовища. Отримані результати дозволяють визначити оптимальні динамічні режими роботи комплексу, які забезпечують ефективне сушіння зернової сировини при раціональному енергоспоживанні.

4.2 Обґрунтування енергетичних параметрів віброозонуючого комплексу

До основних енергетичних параметрів розробленого віброозонуючого комплексу належать: електрична потужність, що витрачається на нагрів сушильного агента за допомогою електричних нагрівальних елементів (N_{HE}); потужність, споживана електродвигуном приводу дебалансного валу ($N_{ПДВ}$); потужність, що витрачається електродвигуном вентилятора ($N_{ПВ}$); а також потужність електронного пристрою синтезу озону ($N_{ПСО}$).

На рис. 4.5 представлено зміну споживаної потужності електричними нагрівальними елементами залежно від температури сушильного агента при фіксованій швидкості його руху ($V_{CA} = 1,5$ м/с).

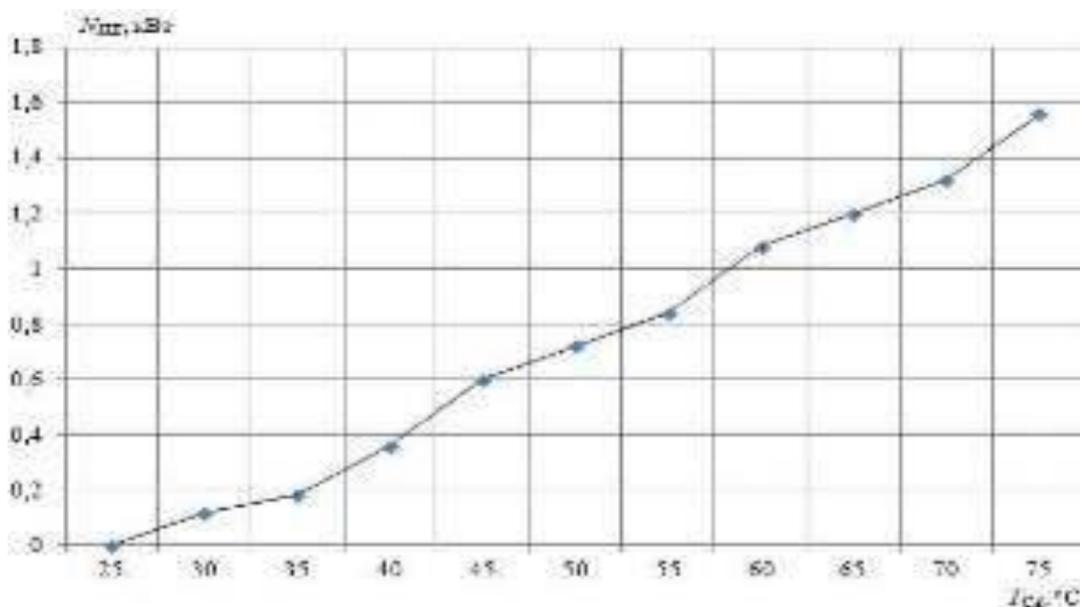


Рисунок 4.5 – Залежність споживаної потужності електричними нагрівальними елементами від температури сушильного агента.

З представлених залежностей видно, що зі збільшенням температури сушильного агента (T_{CA}) споживана потужність електричних нагрівальних елементів (N_{HE}) зростає практично пропорційно.

Під час аналізу енергетичних характеристик віброозонуючого комплексу також встановлено, що потужність, споживана електродвигуном приводу дебалансного валу, залежить від ступеня завантаження робочої камери. Так, при робочій кутовій швидкості ($\omega = 90$ рад/с) значення ($N_{ПДВ}$) становлять: 480 Вт при 75 % завантаженні, 450 Вт при 50 % завантаженні та 390 Вт за відсутності технологічного навантаження.

Під час визначення енергетичних характеристик віброозонуючого комплексу було проведено дослідження змін споживаної потужності та швидкості руху сушильного агента залежно від частоти обертання електродвигуна приводу вентилятора (рис. 4.6).

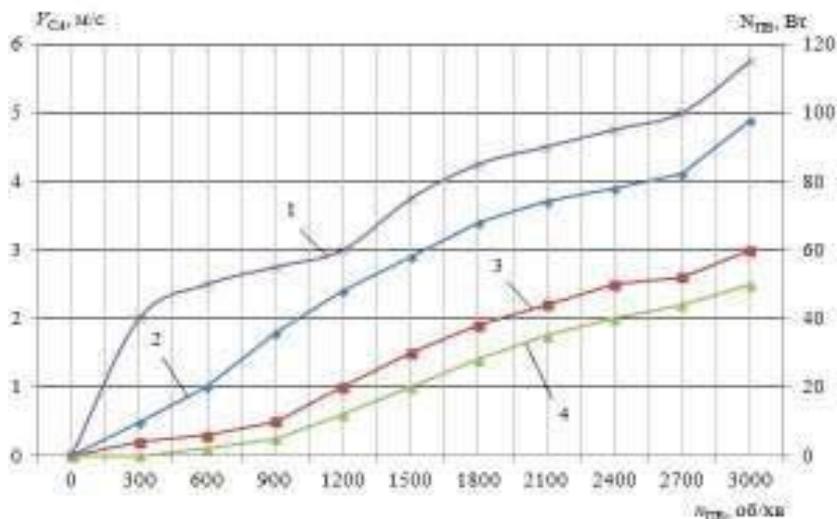


Рисунок 4.6 - Енергетичні характеристики електродвигуна приводу вентилятора:

1 – залежність споживаної потужності від частоти обертання;
 2 – залежність швидкості руху сушильного агента від частоти обертання електродвигуна при відсутності технологічного завантаження сушильної камери;

3 – залежність швидкості руху сушильного агента від частоти обертання електродвигуна при завантаженні 50 % від повного об'єму сушильної камери;

4 – залежність швидкості руху сушильного агента від частоти обертання електродвигуна при завантаженні 75 % від повного об'єму сушильної камери.

З експериментальної кривої випливає, що зі збільшенням частоти обертання електродвигуна споживана ним потужність зростає. Так, при максимальній частоті обертання ($N_{ПВ} = 3000$ об/хв) значення потужності та швидкості руху сушильного агента становлять: ($N_{ПВ} = 115$ Вт) та ($V_{СА} = 4,9$ м/с) за відсутності технологічного завантаження, ($V_{СА} = 3$ м/с) при завантаженні 50 % від об'єму камери, та ($V_{СА} = 2,5$ м/с) при завантаженні 75 % від об'єму камери.

На рис. 4.7 наведено залежність споживаної потужності електронного пристрою синтезу озону ($N_{\text{ПСО}}$) від концентрації згенерованого озону (NO_3).

Рисунок 4.7 – Залежність споживаної потужності електронного пристрою синтезу озону від концентрації згенерованого озону

На основі отриманих енергетичних характеристик розробленого віброозонуючого комплексу побудовано залежність загальних енерговитрат від тривалості обробки (t_0) (рис. 4.8).

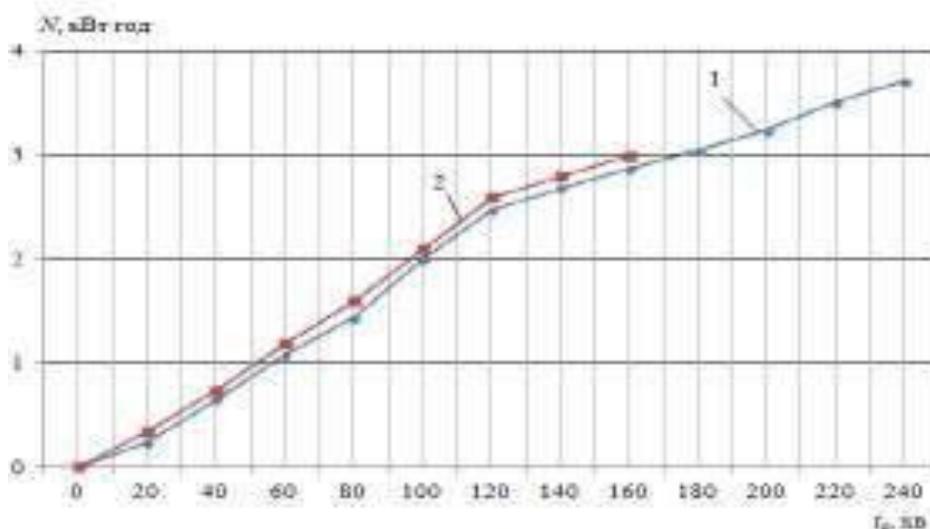


Рисунок 4.8 – Залежність загальних енерговитрат розробленої машини від типу обробки: 1 – без озону у складі сушильного агента; 2 – із озоном у складі сушильного агента.

Аналіз даних рис. 4.8 показав, що питомі енерговитрати на одиницю готової продукції з кінцевою вологістю ($W_k = 14\%$) при початковій вологості ($W_n = 20\%$) складають:

- при використанні класичної технології з подачею теплоагенту температурою $50\text{ }^\circ\text{C}$ та тривалістю обробки 240 хв – 112,93 Вт·год/кг або 18,82 Вт·год/кг на

1 % випарованої вологи (406,54 кДж/кг або 67,75 кДж/кг на 1 % випарованої вологи);

- при застосуванні комплексного теплофізичного впливу за тривалості обробки 160 хв – 91,01 Вт·год/кг або 15,16 Вт·год/кг на 1 % випарованої вологи (327,63 кДж/кг або 54,6 кДж/кг на 1 % випарованої вологи).

Проведений аналіз енергетичних характеристик віброозонуючого комплексу засвідчив, що використання комбінованого теплофізичного впливу, який поєднує вібраційне перемішування матеріалу, озонування сушильного агента та підігрів теплоносія, забезпечує істотне зниження загальних витрат енергії порівняно з традиційним способом сушіння. Встановлено, що частотні режими роботи приводів, маса технологічного завантаження сушильної камери та концентрація озону безпосередньо впливають на споживану потужність усіх складових агрегату. Зокрема, за рахунок інтенсифікації тепло- і масообмінних процесів у зоні обробки відбувається скорочення тривалості сушіння на 30–35 %, що відповідно знижує питомі енерговитрати в середньому на 15–20 %. Отримані результати підтверджують доцільність використання озонованого сушильного агента та вібраційного впливу як ефективних засобів підвищення енергоефективності процесу та можуть бути застосовані для оптимізації режимів роботи обладнання, спрямованих на зменшення енерговитрат і покращення якості кінцевої продукції.

4.3 Обґрунтування експлуатаційних параметрів розробленого комплексу при сушінні зерна

У ході експериментальних досліджень роботи модернізованого віброозонуючого комплексу було здійснено оцінювання впливу комбінованого теплофізичного навантаження на якісні показники зернової сировини під час її сушіння. Для відтворення умов, максимально наближених до реальних виробничих ситуацій, зразки зерна перед проведенням обробки були цілеспрямовано зволожені та інокульовані спорами грибів головні та фузаріуму. Такий підхід дозволив дослідити не лише ефективність зниження

вологості, але й зміни у фітосанітарному стані зернової маси під дією поєднаних факторів – нагріву, озонування та інтенсифікованого вібраційного перемішування.

а)

б)

в)

Рисунок 4.9 – Графіки зміни вологи зерна залежно від віброприскорення а) – за температури сушильного агенту 45 °С; б – за температури сушильного агенту 55 °С; в – за температури сушильного агенту 65 °С; 1 – при завантаженні 75%; 2 – при завантаженні 50 %.

Після завершення циклу обробки отримані зразки зерна оцінювали за комплексом показників, що включали: кінцеву вологість, енергію проростання та схожість, а також ступінь контамінації спорами грибів головні й фузаріуму. Враховували вплив температури сушильного агенту, концентрації озону у його складі та тривалості обробки.

Кінцеву вологість зерна визначали для обох варіантів завантаження камери (50 % і 75 %) при температурі сушильного агенту 45 °С, 55 °С та 65 °С, у складі якого додатково містився озон з концентрацією $\text{NO}_3 = 10 \text{ мг/м}^3$, що узгоджується з науковими рекомендаціями [1].

Тривалість сушіння становила 160 хв, а швидкість руху сушильного агенту підтримувалася на рівні $V_{CA} = 1,5$ м/с. Зазначені умови дали змогу всебічно оцінити реакцію зернової сировини на комбіновану дію температури, озону та вібраційного впливу (рис. 4.9).

Аналіз отриманих кінетичних характеристик процесу сушіння зернової сировини за умови введення до складу сушильного агенту озону з концентрацією $NO_3 = 10$ мг/м³ показує, що підвищення температури теплоносія до 55 °С істотно підсилює інтенсивність вологовиділення. Подальше збільшення температури не забезпечує помітного прискорення процесу масообміну, натомість зумовлює додаткові, технологічно не виправдані енерговитрати.

Крім того, максимальна швидкість зневоднення спостерігається при віброприскореннях $a = 20-25$ м/с². Подальше підвищення інтенсивності вібрацій практично не впливає на кінцевий рівень зниження вологості, тому збільшення віброприскорення вище зазначеного діапазону є недоцільним з огляду на непропорційне зростання енергоспоживання електроприводом дебалансного валу.

Порівняльний аналіз кривих сушіння за умов традиційного вібраційного впливу та комбінованої віброозонуючої дії засвідчує, що введення озону до сушильного агенту у концентрації $NO_3 = 10$ мг/м³ дає змогу скоротити тривалість процесу на $\Delta t_0 = 80$ хв. Це, у свою чергу, забезпечує суттєве зменшення питомих енерговитрат на виконання технологічної операції (рис. 4.10).

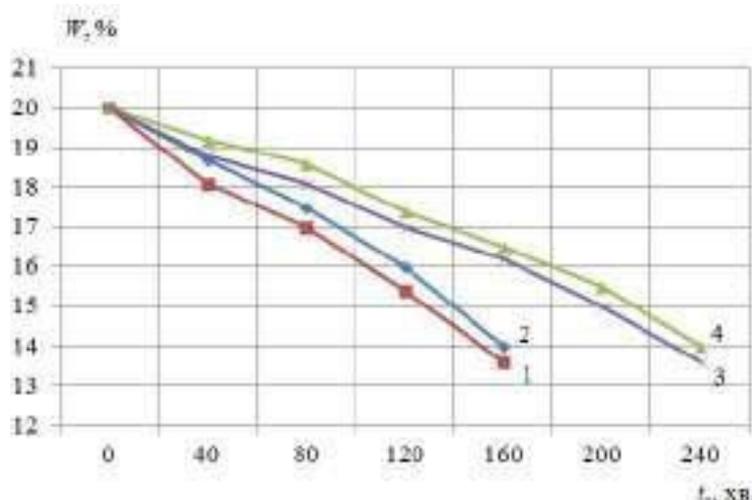


Рисунок 4.10 – Кінетичні криві процесу сушіння зернової сировини.

Криві 1 і 2 ілюструють зміну вологості матеріалу під час обробки сушильним агентом, збагаченим озоном, відповідно за рівнів технологічного завантаження сушильної камери 50 % та 75 % її повного об'єму. Криві 3 і 4 демонструють динаміку вологовиділення за умов традиційного вібраційного сушіння при аналогічних значеннях завантаження робочої камери.

Висновок до четвертого розділу

Встановлено резонансну область ($\omega = 46\text{--}48$ рад/с), у якій динамічні параметри коливань максимальні; підвищення завантаження камери зменшує їх через зростання дисипації.

Потужність нагрівальних елементів та привідних електродвигунів зростає зі збільшенням температури сушильного агента, частоти обертання та завантаження. Комплексний режим з озоном забезпечує нижчі енерговитрати.

Оптимальними умовами сушіння є температура $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ та віброприскорення $20\text{--}25$ м/с². Озонування (10 мг/м³) скорочує тривалість процесу приблизно на 80 хв і підвищує його енергоефективність.

Віброозонуючий вплив забезпечує швидше видалення вологи порівняно з традиційним вібраційним сушінням, підтверджуючи ефективність розробленого комплексу.

РОЗДІЛ 5

ОБҐРУНТУВАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБЛЕНОГО ВІБРООЗОНУЮЧОГО КОМПЛЕКСУ

Економічна ефективність модернізованого або нового зерносушильного обладнання оцінюється на основі його фактичної роботи [19].

Перспективи застосування запропонованого віброозонуючого комплексу, обґрунтованого теоретичними та експериментальними дослідженнями, визначаються через оцінку економічної доцільності його використання. Ця оцінка проводиться шляхом порівняння витрат на виконання процесу сушіння зернової сировини за допомогою розробленого комплексу та базових, серійних моделей обладнання.

Розрахунок економічної ефективності віброозонуючого комплексу виконано з урахуванням річного виробничого навантаження на одну сушарку. Для порівняння обрана серійна зерносушарка СБЦ-3М, яка слугує базовим зразком.

5.1. Визначення вартості розробленої машини

Для оцінки економічної ефективності впровадження віброозонуючого комплексу важливо визначити вартість розробленого обладнання, яка формується з урахуванням вартості матеріалів, комплектуючих, елементів приводу та складання.

Вартість 1 кг чистої маси матеріалів, використаних для виготовлення базової зерносушарки, визначається за формулою:

$$M = \frac{C_{mb}}{\sigma_b}, \quad (5.1)$$

де C_{mb} – вартість матеріалів, грн;

σ_b – маса базової машини без покупних частин, кг.

Витрати на виготовлення нової машини, не враховуючи вартість матеріалів та придбаних комплектуючих на 1 кг її чистої маси:

$$H = \frac{C_b - (C_{mb} + C_{pvn})}{\sigma_b}, \quad (5.2)$$

де C_b – собівартість базової машини, грн;

C_{pvn} – вартість додаткового обладнання, яке використовуються в новій машині, грн.;

σ_b – чиста маса базової машини, кг.

Собівартість нової машини на етапі розробки технічного завдання:

$$C_0 = \sigma_n \times (\lambda \times H \times K_n + M) + C_{pvn} \times K_{tz} \quad (5.3)$$

де σ_n – чиста маса нової машини без покупних частин, кг;

λ – коефіцієнт складності конструктивної нової машини порівняно з виготовленням базової машини;

K_n – коефіцієнт зміни «Н» залежить від об'єму роботи;

K_{tz} – коефіцієнт заготівельно-транспортних робіт.

Нормативний дохід:

$$P_n = \frac{C_0 \times P_0}{100}, \quad (5.4)$$

де P_0 – галузевий норматив рентабельності, %.

Оптова ціна з урахуванням ПДВ нової машини:

$$S_0 = (C_0 + P_n) \times \left(1 + \frac{P_{ПДВ}}{100}\right), \quad (5.5)$$

де $P_{ПДВ}$ – податок на додану вартість (ПДВ), %.

Ціна відпуску нової машини з урахуванням торгової надбавки посередницької організації, яка здійснює її продаж:

$$S_n = S_0 \cdot \left(1 + \frac{T_c}{100}\right), \quad (5.6)$$

де T_c – торгівельна націнка організації посередника, %.

5.2 Визначення економічної ефективності розробленої машини

Добова питома продуктивність машини:

– нової машини:

$$W_{zmn} = (W_n / W_{kn}) \cdot T_n, \quad (5.7)$$

де W_n – продуктивність розробленого віброозонуючого комплексу, кг/год;

W_{kn} – об'єм сушильної камери нової машини;

T_n – тривалість роботи нової машини протягом доби, год;

Обсяг роботи машини в рік:

– нової машини:

$$Q_n = W_{zmn} D_n, \quad (5.9)$$

де D_n – тривалість роботи на протязі року нової машини, днів;

– базової машини:

Зростання виробітку за рік нової машини враховуючи підвищенню її продуктивність:

$$Q = Q_n - Q_b. \quad (5.11)$$

Врахування затрат праці на сушіння зерна:

– нової машини:

$$V_{zn} = \frac{L_n}{W_{zmn}}, \quad (5.12)$$

де L_n – кількість робітників, що обслуговують нову машину, люд.;

– базову машину:

$$V_{zb} = \frac{L_b}{W_{zmb}}, \quad (5.13)$$

де L_b – кількість робітників, що обслуговують базову машину, люд.

Економія річних затрат праці при використанні нової машини:

$$V = Q \cdot (V_{zb} - V_{zn}). \quad (5.14)$$

Основний фонд заробітної плати працівникам:

– нової машини:

$$ZP_{on} = \frac{L_n \cdot f}{W_{zmn}}, \quad (5.15)$$

де f – тарифна годинна ставка працівника, грн/год;

– базової машини:

$$ZP_{ob} = \frac{L_b \cdot f}{W_{zmb}}. \quad (5.16)$$

Відрахування на додаткові виплати, що враховують витрати на чергові та додаткові відпустки, а також час, витрачений на виконання державних і громадських обов'язків:

– нової машини:

$$ZP_{dn} = ZP_{on} \cdot \frac{K_d}{100}, \quad (5.17)$$

де K_d – коефіцієнт, що враховує додаткові доплати до заробітної плати, %.

– базової машини:

$$ZP_{db} = ZP_{ob} \cdot \frac{K_d}{100}, \quad (5.18)$$

Відрахування на оплату праці працівників:

– нової машини:

$$ZP_n = ZP_{on} + ZP_{dn}. \quad (5.19)$$

– базової машини:

$$ZP_b = ZP_{ob} + ZP_{db}. \quad (5.20)$$

Відрахування на соціальні потреби:

– нової машини:

$$CP_n = \frac{ZP_n \cdot K_s}{100}, \quad (5.21)$$

де K_s – коефіцієнт, який враховує відрахування на соціальні потреби, %;

– базової машини:

$$CP_b = \frac{ZP_b \cdot K_s}{100}, \quad (5.22)$$

Амортизаційні відрахування, призначені для оновлення та відновлення машини:

– нової машини:

$$A_n = \frac{S_n \times a}{100W_{zmn} \times T_n \times D_n}, \quad (5.23)$$

де a – нормативний коефіцієнт відрахувань на оновлення та відновлення, %;

– базової машини:

$$A_b = \frac{S_b \times a}{100W_{zmb} \times T_b \times D_b}, \quad (5.24)$$

Відрахування на капітальний, поточний ремонт і технічне обслуговування машини:

– для нової машини:

$$R_n = \frac{S_n \cdot a}{100 \cdot W_n \cdot T_n \cdot D_n}; \quad (5.25)$$

– для базової машини:

$$R_b = \frac{S_b \cdot a}{100 \cdot W_b \cdot T_b \cdot D_b}; \quad (5.26)$$

Витрати на енергоресурси, необхідні для приводу машини:

– для нової машини:

$$P_{zn} = \frac{N_{cn} \times t_{vn} \times C_e}{W_{zmn}}, \quad (5.27)$$

де N_{cn} – загальна потужність приводу нової машини, кВт;

t_{vn} – тривалість роботи електродвигунів нової машини за 1 годину, год;

C_e – ціна електроенергії, грн/(кВт год);

– базової машини:

$$P_{zb} = \frac{N_{cb} \cdot t_{vb} \cdot C_e}{W_{zmb}}, \quad (5.28)$$

де N_{cb} – загальна потужність приводу базової машини, кВт;

t_{vb} – тривалість роботи електродвигунів базової машини за 1 годину, год;

Витрати на зберігання машини:

– нової машини:

$$Z_n = \frac{T_{nn} \times T_{sn}}{Q_n}, \quad (5.29)$$

де T_{nn} – норматив витрат праці на підготовку нової машини до зберігання, люд.-год;

T_{sn} – годинна тарифна ставка слюсаря, який обслуговує нову машину, грн/год;

– базової машини:

$$Z_b = \frac{T_{nb} \cdot T_{sb}}{Q_b}, \quad (5.30)$$

де T_{nb} – норматив витрат праці на підготовку базової машини до зберігання, люд.-год;

T_{sb} – годинна тарифна ставка слюсаря, який обслуговує базову машину, грн/год;

Експлуатаційні відрахування:

– нової машини:

$$U_{emn} = \frac{U_{mn}}{Q_n}, \quad (5.31)$$

де U_{mn} – витрата на матеріали, що використовуються при експлуатації нової машини, грн;

– для базової машини:

$$U_{emb} = \frac{U_{mb}}{Q_b}, \quad (5.32)$$

де U_{mb} – витрата на матеріали, що використовуються при експлуатації базової машини, грн;

Повна собівартість робіт:

– нової машини:

$$C_{sn} = ZP_n + CP_n + A_n + R_n + P_{zn} + Z_n + U_{emn}; \quad (5.33)$$

– базової машини:

$$C_{sb} = ZP_b + CP_b + A_b + R_b + P_{zb} + Z_b + U_{emb}; \quad (5.34)$$

Експлуатаційні витрати на машину:

– нової машини:

$$U_n = ZP_n + CP_n + R_n + P_{zn} + U_{emn}; \quad (5.35)$$

– для базової машини:

$$U_b = ZP_b + CP_b + R_b + P_{zb} + U_{emb}; \quad (5.36)$$

Питомі капіталовкладення в сфері експлуатації машини:

– для нової машини:

$$K_{pn} = \frac{S_n}{W_n \cdot D_n \cdot T_n}; \quad (5.37)$$

– для базової машини:

$$K_{pb} = \frac{S_b}{W_b \cdot D_b \cdot T_b}; \quad (5.38)$$

де S_b – відпускна ціна базової машини, грн.

Питома металомісткість машини:

– для нової машини:

$$M_n = \frac{\sigma_{zn}}{Q_n}, \quad (5.39)$$

де σ_{zn} – маса нової машини в зборі, кг;

– для базової машини:

$$M_b = \frac{\sigma_{zb}}{Q_b}, \quad (5.40)$$

де σ_{zb} – маса нової машини в зборі, кг;

Річна економія на експлуатаційних витратах під час використання розробленого віброозонуючого комплексу:

$$E_r = (Q_n - Q_b) \times (U_b - U_n). \quad (5.41)$$

Термін окупності капіталовкладень:

$$T_{ok} = \frac{S_n}{E_r}. \quad (5.42)$$

Отримані результати економічного розрахунку віброозонуючого комплексу в порівнянні з базовою машиною заносимо до таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Результати розрахунку економічної ефективності віброозонуючого комплексу в порівнянні з базовою машиною

Показники	Машина	
	Нова	Базова
1	2	3
Оптова ціна нової машини з урахуванням ПДВ, грн	1,206 10^5	-
Відпускна ціна нової машини з урахуванням торговельної націнки посередницької організації, яка здійснює продаж техніки, грн	1,35 10^5	-
Основна заробітна плата працівників, грн/кг	1,667 $\cdot 10^{-3}$	0,014

Відрахування на додаткову оплату, які враховують витрати на оплату чергових і додаткових відпусток, часу на виконання державних і громадських обов'язків, грн	$3,333 \cdot 10^{-4}$	$2,769 \cdot 10^{-3}$
Відрахування на оплату праці працівників, грн/кг	$2 \cdot 10^{-3}$	0,017
Відрахування на соціальні потреби, грн/кг	$7,568 \cdot 10^{-4}$	$6,287 \cdot 10^{-3}$
Амортизаційні відрахування на реновацію машини, грн/кг	$2,466 \cdot 10^{-4}$	$2,488 \cdot 10^{-3}$
Витрати на енергоресурси для приводу машини, грн/кг	$6,46 \cdot 10^{-4}$	0,01
Витрати на зберігання машини, грн/кг	$1,389 \cdot 10^{-5}$	$3,846 \cdot 10^{-5}$
Відрахування на експлуатаційні матеріали, грн/кг	$3,858 \cdot 10^{-6}$	$2,051 \cdot 10^{-5}$
Повна собівартість робіт, грн/кг	$3,914 \cdot 10^{-3}$	0,038
Експлуатаційні витрати на машину, грн/кг	$3,667 \cdot 10^{-3}$	0,036
Питомі капіталовкладення в сфері експлуатації машини, грн/кг	$1,737 \cdot 10^{-3}$	0,018
Питома металомісткість машини, кг/кг	$8,179 \cdot 10^{-5}$	$1,496 \cdot 10^{-3}$
Річна економія грошових засобів на експлуатаційних витратах під час використання нової машини, кг	$6,669 \cdot 10^4$	-
Термін окупності капіталовкладень на розробку машини, р	2,02	-

Висновок до п'ятого розділу

Впровадження розробленого віброозонуючого комплексу дозволяє скоротити енергоспоживання та загальні витрати на сушіння зернової сировини, забезпечуючи річний економічний ефект 66 690 грн. Середній термін

окупності комплексу становить близько 2 років, що підтверджує його доцільність для промислового використання.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У кваліфікаційній роботі виконано комплексне дослідження процесів сушіння зерна із застосуванням вібраційно-озонного впливу та обґрунтовано конструктивно-технологічні параметри віброозонуючого комплексу, спрямованого на підвищення ефективності післязбиральної доробки.

Проведений аналіз існуючих технологій сушіння засвідчив, що традиційні теплові методи мають низку недоліків – нерівномірний прогрів, значні енерговитрати та ризик пошкодження зерна. Це обумовило необхідність пошуку комбінованих способів інтенсифікації процесу без додаткового термічного навантаження.

У роботі розроблено структурно-функціональну схему віброозонуючого комплексу та запропоновано раціональні конструктивні рішення вузлів подачі, розподілу озону та формування вібраційного поля. Створено математичну модель взаємодії озонотранспортного середовища із зерновою масою під дією вимушених коливань, що дозволило встановити вплив амплітуди, частоти та кута коливань на інтенсивність сушіння та рівномірність обробки.

Експериментальні дослідження підтвердили, що поєднання озонування з вібрацією забезпечує скорочення тривалості сушіння, підвищення однорідності зниження вологості, а також зменшення мікробіологічного навантаження порівняно з традиційними методами. Отримані статистично достовірні залежності дозволили визначити оптимальні режими роботи комплексу.

Розроблені конструктивно-технологічні параметри забезпечують стабільність процесу, зменшення енерговитрат та підвищення якості кінцевого продукту, що підтверджує практичну цінність запропонованої технології. Віброозонуючий комплекс може бути впроваджений у зерноочисно-сушильні лінії для покращення ефективності післязбиральної доробки та підвищення біобезпеки продукції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бендера І.М. Технологічне обладнання переробних та харчових виробництв. Лабораторний практикум для студентів інженерних спеціальностей / Бендера І.М., Стрельчук О.Я., Семенов О.М. Кам'янець-Подільський: ФОП Сисин О.В., 2008. 204с.
2. Борисова С.В. Озон в атмосфері / Навчальний посібник. Одеса: 2011. 113 с
3. Буряк, В.І., & Кузьменко, С.П. (2018). Технологія сушіння зернових культур: підручник. Київ: ЛНУ.
4. Гнатюк, П.М. (2017). Енергетичні аспекти сучасних зерносушильних установок . Харків: ХНУ.
5. Калетнік Г.М., Войтюк В.Д., Бондар С.М. та ін. Управління інженерною діяльністю виробничих і сервісних підприємств АПК. Київ : 2010. 448 с.
6. Камінський В.Д. Переробка та зберігання сільськогосподарської продукції: навч. посібник для вузів / В.Д. Камінський, М.Б. Бабич. Одеса: Аспект, 2020. 460 с.
7. Коваленко, І.О., & Петров, О.В. (2020). Моделювання процесу сушіння зерна в об'єктах з комбінованим впливом. Вісник аграрної науки , 12(3), 45–52.
8. Ляшенко, В.М. (2019). Енергоефективні технології сушіння зерна. Одеса: ОНАХТ.
9. Майструк С.В., Підлісний В.В. Обґрунтування конструкції віброозонуючого комплексу для сушіння зерна // Перші наукові кроки – 2025: збірник наукових праць ХІХ Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів та молодих науковців (17 квітня 2025 р., м. Кам'янець-Подільський). Кам'янець-Подільський: 2025. 57 с.
10. Машина та обладнання переробних виробництв: Навч. посібник / О.В. Дацишин, А. І. Ткачук, Д. С. Чубов та ін.; за заг. ред. О. В. Дацишина. Київ : Вища освіта, 2005. 159 с.
11. Мирончук В.Г., Орлов Л.О., Українець А.І. та інші. Розрахунки обладнання підприємств переробної і харчової промисловості. Навчальний

посібник. Вінниця: Нова книга, 2004. 288 с.

12. Методичні рекомендації для виконання та оформлення дипломної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності Н7 «Агроінженерія» / Ю.І. Панцир, А.В. Рудь, В.І. Дуганець, В.І. Дуганець, Л.С. Шелудченко, С.М. Грушецький, Комарніцький С.П. За ред. В.І. Дуганця. Кам'янець-Подільський: ЗВО «ПДУ», 2025. 52 с.

13. Мельник, С.В. (2016). Використання озону у технології післязбиральної обробки зерна. Збірник наукових праць НУБіП України, 212, 78–84.

14. Науково-технічний комітет з питань сільськогосподарських машин. (2015). Методи вимірювання енергоспоживання та технічних характеристик зерносушильних машин: ДСТУ 4025-2015. Київ: УкрНДІМ.

15. Павлище В. Т. Основи конструювання та розрахунок деталей машин : підручник / В. Т. Павлище. Львів : Афіша, 2003. 558 с.

16. Паламарчук В.І. Обґрунтування параметрів процесу та обладнання конвеєрного інфрачервоного сушіння сировини олійного виробництва: дис. канд. техн. наук: 05.18.12. Одеса : 2016. 266 с.

17. Паламарчук І.П., Цуркан О.В., Присяжнюк Д.В. та ін. Обґрунтування схеми віброозонуючої сушарки для післязбиральної обробки. Наукові праці Національного університету харчових технологій. Київ, 2016. 6. С. 151-156.

18. Пат. КМ 124005 Україна. Вібраційна сушарка. Опубл. 12.03.2018.

19. Пат. КМ 124870 Україна. Вібраційна сушарка. Опубл. 25.04.2018.

20. Пат. КМ 126546 Україна. Віброозонуюча сушарка. Опубл. 25.06.2018.

21. Підлісний В.В., Машини, обладнання та їх використання при переробці сільськогосподарської продукції / Інструктивно-методичні матеріали до лабораторних занять по розділу Машини та обладнання для переробки продукції рослинництва / для здобувачів першого бакалаврського рівня спеціальності 208 «Агроінженерія» / В. В. Підлісний, О. М. Семенов, Кам'янець-Подільський: 2024. 131 с.

22. **Підлісний В. В.**, Інструктивно-методичні матеріали до лабораторно-практичних занять з дисципліни «Підйомно-транспортні машини» змістовий модуль: «Транспортувальні машини та навантажувачі» / для здобувачів

першого бакалаврського рівня спеціальності 208 Агроінженерія / В. В. Підлісний, О. М. Семенов, Кам'янець-Подільський:, 2025. 88с.

23. Пономаренко, А.Г., & Сидоренко, М.В. (2018). Вібраційні методи інтенсифікації процесу сушіння зерна. Техніка і технології АПК, 5(2), 23–31.

24. Присяжнюк Д.В. Озон як рушійний фактор для видалення зв'язаної вологи із зернової сировини. Вібрації в техніці та технологіях. Вінниця : 2018. № 2 (89). С. 94-97.

25. Степаненко, О.О., & Романенко, В.І. (2021). Аналіз показників ефективності зерносушильного обладнання. Аграрна техніка, 3(1), 12–19.

26. Ткаченко С. Й. Сушильні процеси та установки / С. Й. Ткаченко, О.Ю. Співак. Вінниця : ВНТУ, 2009. 86 с.

27. Технологічне обладнання зернопереробних та олійних виробництв/ О.В.Дацишин, А.І.Ткачук, О.В.Гвоздєв та ін. Навчальний посібник. Вінниця: Нова книга, 2008. 488 с.

28. Технологія та проектування елеваторів : навч. посібник / О. І. Шаповаленко, О. О. Євтушенко, Т. І. Янюк, В. А. Почеп ; за ред. О. І. Шаповаленко ; Нац. ун-т харч. технол. Херсон : Олді-плюс, 2015. 416 с.

29. Фролов, Ю.М. (2017). Проектування та модернізація сушильних комплексів зерна. Харків: ХНАУ.

30. Харченко, Л.П. (2019). Використання комбінованих теплофізичних впливів у процесах сушіння зерна. Сільськогосподарська інженерія, 4(7), 44–50.

31. Цуркан О.В., Пришляк В.М., Присяжнюк Д.В. Інтенсифікація сушіння зерна у процесі його післязбиральної обробки. Техніка, енергетика, транспорт АПК. Вінниця, 2017. № 2 (97). С. 99-104.

32. Цуркан О.В., Герасимов О.О., Коломієць О.С. та ін. Перспективи використання озону в післязбиральній обробці зерна. Техніка, енергетика, транспорт АПК. Вінниця, 2016. № 3 (95). С. 80-84.

33. Чурсінов Ю. Порівняльний огляд технічних засобів сушіння зерна. Пропозиція. Київ : 2016. С. 122-124.

34. Ялпачик В.Ф. Машини, обладнання та їх використання при переробці сільськогосподарської продукції. Лабораторний практикум. Навчальний

посібник / В.Ф. Ялпачик, В.О. Олексієнко, Ф.Ю. Ялпачик, К.О. Самойчук, О.В. Гвоздєв, В.Г. Циб, Н.О. Паляничка, В.І. Шевченко, Ю.О. Борхаленко, С.Ф. Буденко. Мелітополь.: ТОВ «Видавничий будинок ММД», 2015. 197 с.

35. <https://agroexpert.ua/>

36. <https://lubnymash.com/zernosusharki-uk>

37. <https://gcs.com.ua/susharka-dlya-zerna>

38. <https://kmzindustries.ua/product/zernosushilki-brice-baker>

39. <https://riela.com.ua/zernosushilka-stacionarnaya-tip-gdt/>

40. <https://euro-elevator.ppc.com.ua/>

41. <https://www.waterlight.pro/>