

УДК 637.2

№ держреєстрації

0121U110201

Інв. №

Міністерство освіти і науки України
Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного
(ТДАТУ)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з наукової роботи
д.т.н., професор
_____ Анатолій ПАНЧЕНКО

ЗВІТ
ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ

Програма 6

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ І
ОБЛАДНАННЯ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ І ПЕРЕРОБКИ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ПРОДУКЦІЇ**
(заключний)

Директор НДІ АТЕ
д.т.н., проф.



Олеся ПРИСС

Науковий керівник
д.т.н., проф.




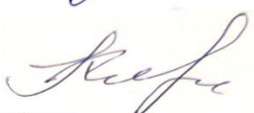


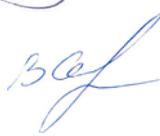
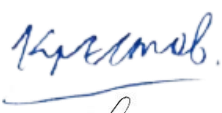



Кирило САМОЙЧУК

2025

Рукопис закінчено 7 грудня 2025 р.
Результати цієї роботи розглянуто Науково-технічною радою
Науково-дослідного інституту «Агротехнологій та екології»
протокол №2 від 15 грудня 2025 р.

Список виконавців

- | | | |
|--|--|--|
| <p>1. Керівник підпрограми,
д.т.н., професор, завідувач
кафедри ОПХВ
ім. проф. Ф.Ю. Ялпачика</p> |  | <p>Самойчук К.О.
(розділ 2, 5, 6, 7, 8,
9)</p> |
| <p>2. д.т.н., проф.</p> | | <p>Кюрчев С.В.
(розділ 5, 7, 8, 9)</p> |
| <p>3. к.т.н., доц.</p> |  | <p>Паляничка Н.О.
(розділ 8)</p> |
| <p>4. д.т.н., проф.</p> |  | <p>Журавель Д.П.
(розділ 1)</p> |
| <p>5. к.т.н, ст викл.</p> |  | <p>Ковальов О.О.
(розділ 7, 9)</p> |
| <p>6. асистент</p> |  | <p>Червоткіна О.О.
(розділ 4)</p> |
| <p>7. к.т.н., доц.</p> |  | <p>Ломейко О.П.
(розділ 3, 10)</p> |
| <p>8. аспірант</p> |  | <p>Самохвал В.А.
(розділ 2)</p> |
| <p>9. аспірант</p> |  | <p>Крестов В.Г.
(розділ 3, 10)</p> |
| <p>10. асистент</p> |  | <p>В'юник О.В.
(розділ 5)</p> |

ЗМІСТ

1. Механіко-технологічне обладнання та процеси для переробки насіння рицини на енергетичну біосировину	4
2. Підвищення ефективності роботи установки для виготовлення паливних брикетів	25
3. Зберігання ягід із застосуванням заморожування та охолодження	38
4. Підвищення ефективності процесу гранулювання вторинної сировини сокового виробництва	45
5. Оптимізація параметрів струминного змішування напоїв	54
6. Підвищення ефективності гомогенізації молока в клапанних гомогенізаторах	75
7. Методологія дослідження параметрів струминних гомогенізаторів молока	84
8. Дослідження процесу диспергування емульсії в імпульсному гомогенізаторі	99
9. Розробка струминно-щілинного гомогенізатора молока	109
10. Обґрунтування параметрів плівкового теплообмінника для швидкого охолодження	124
11. Обґрунтування кінематичних параметрів луцильного пристрою ударної дії	135

РОЗДІЛ 1

МЕХАНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ ТА ПРОЦЕСИ ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ НАСІННЯ РИЦИНИ НА ЕНЕРГЕТИЧНУ БІОСИРОВИНУ

РЕФЕРАТ

Об'єкт досліджень – коробочки, третинки та насіння рицини сортів Донська, Афродіта, Олеся, Хортичанка, ВНИИМК-165, Гібрид ранній, Хортицька 1, Хортицька 3 та Хортицька 7, а також процеси їх переробки та очищення рицинової олії.

Предмет дослідження – закономірності геометричних, аеродинамічних, фізико-механічних та електротехнологічних характеристик компонентів вороху рицини та вплив цих властивостей на ефективність переробки і очищення рицинової олії.

Мета дослідження – комплексне вивчення властивостей коробочок, третинок та насіння рицини для:

- встановлення їх геометричних та аеродинамічних характеристик;
- розробки математичної моделі процесу обрушення насіння;
- підвищення ефективності очищення рицинової олії в електричному полі.

Методи досліджень. Експериментальні дослідження проводились у лабораторних умовах відповідно до прийнятих методик та галузевих стандартів. Використовувались методи статистичної обробки результатів, табличний процесор Microsoft Excel, а також чисельні методи (метод Рунге–Кутта) у середовищі програми Mathcad.

Основні результати досліджень:

Встановлені геометричні розміри вороху рицини залежно від сорту: довжина та ширина коробочок; довжина, ширина та товщина третинок. Для кожного варіаційного ряду підтверджено закон нормального розподілу.

Отримано варіаційні криві розподілу третинок, насіння і коробочок за середньою швидкістю витання; експериментально визначені коефіцієнти парусності третинок насіння.

Встановлено вплив частоти обертання та кута розташування вальців на якість процесу обрушення насіння рицини: зі збільшенням частоти зростає продуктивність обладнання, але й кількість січки; зміна кута валків впливає на співвідношення цілого насіння та січки.

Розроблено диференційне рівняння динаміки руху крапель води та гідратованих фосфатидів у рициновій олії в електричному полі. Встановлено залежність швидкості осадження крапель від напруги на електродах, що дозволило розрахувати час видалення вологи та фосфатидів.

ВСТУП

Рицина є високоолійною технічною культурою, основним продуктом переробки якої є касторова олія. Вона має широке застосування у хімічній, електротехнічній, медичній, авіаційній, поліграфічній та інших галузях промисловості, а також використовується для виготовлення біопалива. Унікальні властивості рицинової олії, зокрема високий вміст рицинолевої кислоти та діелектрична проникність, роблять її незамінною або важко замінною у багатьох сферах виробництва.

В умовах сучасної економічної ситуації рицина може стати важливим чинником енергетичної безпеки України, забезпечуючи заміну нафтопродуктів паливо-мастильними матеріалами рослинного походження. Крім того, продукти її переробки мають значення для тваринництва: макуха після детоксикації може бути використана як високобілкова кормова добавка, а побічні рослинні залишки — для виробництва біогазу та твердого біопалива.

Ефективність виробництва рицинової олії значною мірою залежить від післязбиральної обробки насіння (очищення, сушіння, сортування), яка визначає вихід і якість продукції. Для цього необхідне застосування спеціальних машин, що враховують фізико-механічні та аеродинамічні властивості компонентів вороху — коробочок і третинок. Встановлення їхніх геометричних параметрів та удосконалення процесів лущення і сепарації є актуальним завданням, адже це підвищує продуктивність обладнання, зменшує втрати олії та покращує якість кінцевої продукції.

Таким чином, створення сучасного переробного комплексу для виробництва рицинової олії та її похідних потребує нових технологічних рішень і спеціалізованого устаткування, що забезпечить високу якість продукції та розширить можливості її використання у різних галузях промисловості.

Методи і програма досліджень Експериментальні дослідження проводились у лабораторних умовах відповідно до прийнятої методики та галузевих стандартів з використанням статистичної обробки результатів досліджень та з використанням табличного процесора Microsoft Excel.

Програмою досліджень передбачено комплексне вивчення властивостей та процесів, пов'язаних із переробкою рицини, а саме:

- встановлення лінійних розмірів коробочок і третинок окремих сортів рицини у розрізі їх відсоткової кількості
- встановлення аеродинамічних властивостей окремих сортів рицини у розрізі їх відсоткової кількості.
- встановлення технологічних режимів та конструктивних параметрів обладнання для обрушення насіння рицини.

- МЕТОДИ І ПРОГРАМА ДОСЛІДЖЕНЬ

При визначенні геометричних характеристик використовували сорти рицини: Донська, Афродіта, Олеся, Хортичанка, ВНИИМК-165, Гібрид ранній, Хортицька 1, Хортицька 3, Хортицька 7.

При вимірюваннях застосовувався штангель циркуль електронний МІОЛ 15-241 із довжиною шкали 150 мм та точністю вимірювань 0,01 мм (рис. 3).

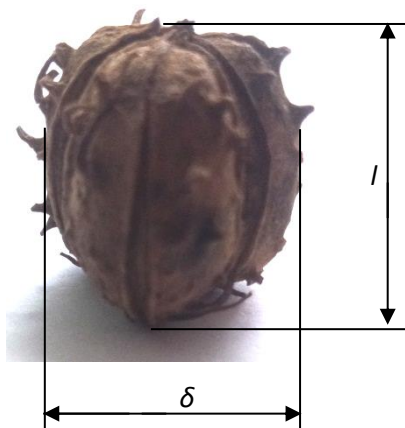


Рис. 1 – Загальний вигляд коробочки рицини:

l = довжина коробочки, δ – товщина коробочки

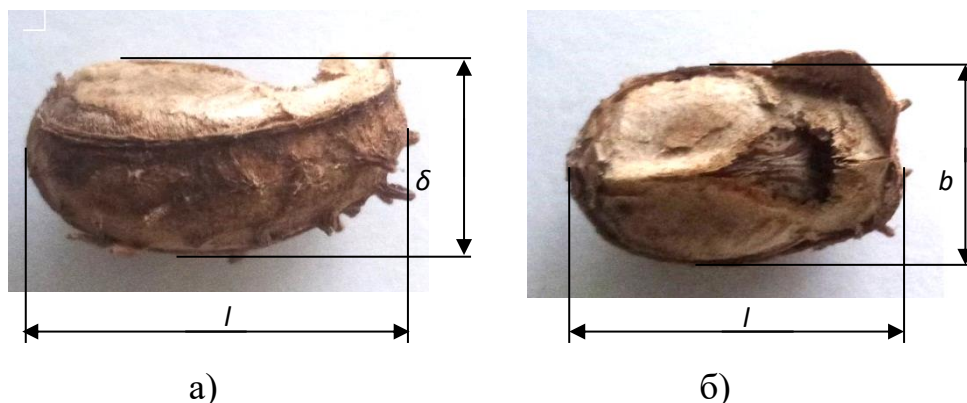


Рис. 2 – Загальний вигляд третинки рицини: а) – лежачи;

б) – боком; l = довжина третинки; b – ширина третинки; δ – товщина третинки.

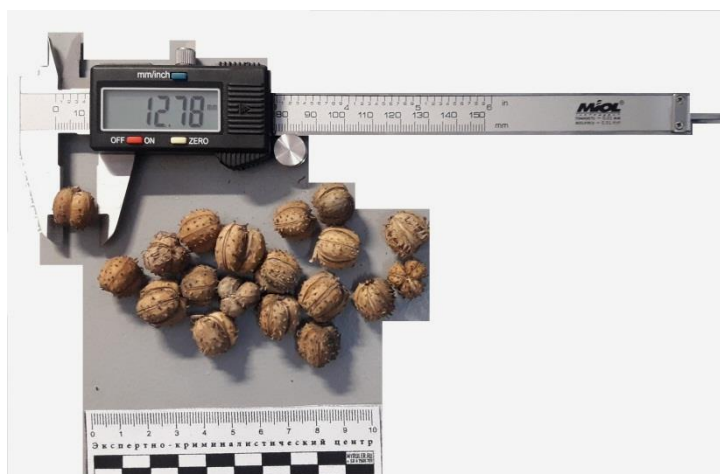


Рис. 3 – Штангель циркуль електронний MIOL 15-241 із рициною

Методика досліджень була наступною.

1. Із загальної кількості рицини одного сорту, навмання бралася коробочка рицини. За допомогою штангель циркуля вимірювалися її довжина та товщина. Значення фіксувалися. Потім, брали іншу коробочку і повторювали такі ж самі вимірювання. Загальні кількість складала 100 вимірювань. Вимірювання проводили для кожного сорту рицини.

2. Навмання брали коробочку рицини, розділяли її на третинки. У кожній третинці вимірювали за допомогою штангель циркуля її довжину, ширину та товщину. Загальна кількість вимірювань складала 100 для кожного сорту рицини.

3. Для побудови інтервального ряду визначали величину інтервалу, встановлювали повну шкалу інтервалів, у відповідності до неї групували результати спостережень. Для визначення оптимальної величини інтервалу h , при якій ряд не був би занадто громіздким і, в той же час, дозволив би виявити характерні риси випадкової величини x , використовують формулу Стер-Джеса [4]:

$$h = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{1 + 3,322 \lg n}, \quad (1)$$

де x_{\max} , x_{\min} – максимальний і мінімальний варіанти відповідно;
 n – кількість дослідів.

За початок першого інтервалу рекомендується приймати величину, що дорівнює [4]:

$$a_1 = x_{\min} - \frac{h}{2}, \quad (2)$$

тоді [4]:

$$a_i = a_{i-1} + h, \quad (3)$$

де $i = 2, 3, 4 \dots$

Побудову інтервалів продовжується до тих пір, поки початок наступного по порядку інтервалу не буде рівним або більшим x_{\max} .

Характеристики розподілу випадкової величини x оцінюють за допомогою характеристик вибірки (характеристик варіаційних рядів), які при збільшенні n сходяться за ймовірністю до відповідних характеристик x , і при досить великому n можуть бути наближено рівними їм [5].

До основних характеристик варіаційних рядів відносять: вибірккову середню арифметичну – \bar{x} , виправлену дисперсію – S^{*2} , середнє квадратичне відхилення – S^* , коефіцієнт варіації – V , розмах варіації – R , асиметрію – A_s , ексцес – E_x .

Вибіркова середня арифметична \bar{x} , визначається за формулою [6]:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}. \quad (3)$$

Дисперсія S^{*2} , визначається за формулою [4-6]:

$$S^{*2} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}. \quad (4)$$

Середнє квадратичне відхилення S^* (емпіричний стандарт) визначається за формулою [4-6]:

$$S^* = \sqrt{S^{*2}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}. \quad (5)$$

Коефіцієнт варіації за середнім квадратичним відхиленням V , визначається за формулою [4-6]:

$$V = \frac{S^*}{\bar{x}} \cdot 100\%. \quad (6)$$

Розмах варіації R , розраховується за формулою [4-6]:

$$R = \max x_i - \min x_i. \quad (7)$$

Асиметрія A_s , визначається за формулою [4-6]:

$$A_s = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{n \cdot S^{*3}}. \quad (8)$$

Ексцес E_x , визначається за формулою [4-6]:

$$E_x = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{n \cdot S^{*4}} - 3. \quad (9)$$

Середні величини є узагальнюючими кількісними характеристиками сукупності однотипних явищ за вар'юючою ознакою. Середнє арифметичне характеризує середнє значення, близько до якого групуються можливі значення випадкової величини. Дисперсія є міра розкиданості цих значень відносно середнього. Середнє квадратичне відхилення є мірою коливаності, але на відміну від дисперсії являє собою абсолютну величину, що виражена в тих же одиницях, що і варіанти. Коефіцієнт варіації є відносним показником коливання. Варіаційний розмах (або широта розподілу) нестійка, надзвичайно залежна від випадковостей величина, що служить для приблизної оцінки варіації. Асиметрія і ексцес є показниками відхилення функції розподілення $f(x)$ для x від нормального закону розподілення. Якщо $A_s = 0$, то крива для $f(x)$ симетрична, при $A_s \neq 0$ - асиметрична. При $A_s > 0$ права частина розподілення довше лівої, $A_s < 0$ - навпаки. Ексцес характеризує крутизну кривої розподілення. Якщо $E_x \neq 0$, то вершина кривої для $f(x)$ знаходиться або вище (при $E_x > 0$), або нижче (при $E_x < 0$) вершини кривої нормального розподілення [7].

Лінійні розміри олійних культур завжди підпорядковуються закону нормального розподілення [8], який визначається з урахуванням характеристик варіаційних рядів та виходячи із типової залежності [7]:

$$\Phi = \frac{1}{S^* \sqrt{2\pi}} \cdot e^{\left(-\frac{x-\bar{x}}{2 \cdot S^{*2}}\right)}. \quad (10)$$

Для розділення суміші використовують різницю у властивостях її окремих компонентів [1]: за розмірами; за масою (густиною); за здатністю до електризації (електрофізичні властивості); за пружністю; за опором тертя; за аеродинамічними властивостями; комбінуванням; за формою; за кольором та ін. Одним з найважливіших недоліків для всіх способів розділення вороху рицини є висока травмованість насіння рицини внаслідок дотику з робочими поверхнями. Тому найбільш перспективний спосіб який забезпечить низьку

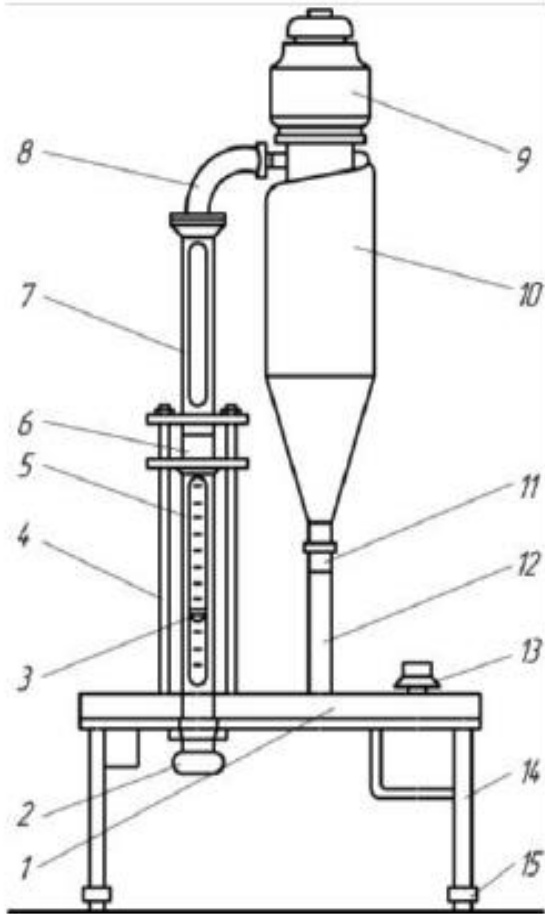
травмованість насіння є розділення суміші за аеродинамічними властивостями (за допомогою повітряного потоку) [2, 3]. Розділення вихідної суміші частинок за допомогою повітряного потоку складається з трьох основних етапів: завантаження вороху рицини в повітряний канал, розділення частинок суміші на фракції за аеродинамічними властивостями та відділення збільшеної легкої фракції від повітряного потоку. В основі роботи повітряних каналів сепаруючих машин лежить другий етап, закономірності якого визначають ефективність сепарування вихідної суміші. Відповідно, ефективність сепарування буде залежати від правильно встановлених аеродинамічних характеристик вороху, що і є актуальною задачею.

Основними показниками аеродинамічних властивостей вороху насіння рицини є коефіцієнт парусності і швидкість витання (критична швидкість). Дослідження проводилися за допомогою ротаметричного порційно-парусного класифікатора РПК-30, схема якого представлена на рис. 4а та загальний вигляд на рис 4б.

Стіл 1 (рис. 4а) класифікатора встановлений на чотирьох ніжках 14 з регулювальними опорами 15, що дозволяють встановлювати ротаметр 5 і канал 7 в вертикальне положення. Усередині ротаметра під впливом повітряного потоку переміщається поплавець 3. На столі встановлені чотири направляючі стійки 4, на яких змонтований пневмокласифікуючий канал 7 і одна підтримуюча стійка 12 для кріплення циклону 10. По стійкам 4 ковзають фланці ротаметра 5 разом із вхідним колектором 2. При переміщенні вгору за допомогою важільного механізму, вмонтованого в стіл, ротаметр своїм верхнім фланцем притискає змінну касету 6 із насінням до нижнього торця каналу 7. На вихідній трубі циклону встановлений вентилятор з електродвигуном 9, а в нижній частині конуса циклону - приймальний стаканчик 11. Канал 7 з'єднаний з циклоном 10 патрубком 8. Швидкість повітряного потоку в пневмокласифікуючому каналі регулюють за допомогою лабораторного автотрансформатора (ЛАТР) 13 шляхом зміни частоти обертання колеса вентилятора.

Установка працює у такий спосіб: в касету, засипається ворох насіння рицини (окремо коробочки, третинки, обрушене насіння) масою 20...30 г. Далі, касета встановлюються в РПК-30. Включаються електродвигун 1, поступово збільшують частоту обертання колеса вентилятора за допомогою ЛАТРа, встановлюють швидкість початку переміщення (мінімальна швидкість витання) вороху насіння в пневмокласифікуючому каналі 7. Відзначають відповідне мінімальній швидкості витання вороху положення поплавка в ротаметрі. Далі, ЛАТРОм поступово збільшують швидкість повітря в пневмокласифікуючому каналі до моменту виходу з каналу

останнього елементу вороху рицини (максимальна швидкість витання). Відзначають відповідне максимальній швидкості витання вороху положення поплавка в ротаметрі. Потім поплавок плавно опускають, повільно зніжують частоту обертання колеса вентилятора. За отриманими показниками шкали ротаметра и тарувальному графіку (рис. 5) прилада (рис 4б) визначають значення мінімальної и максимальної швидкості витання елементів вороху рицини.



а)

б)

Рисунок 4. Схема ротаметричного порційно-парусного класифікатора: а) конструктивна схема; б) загальний вигляд РПК-30: 1 - стіл; 2 - вхідний патрубок; 3 - поплавок; 4, 12 - стійки; 5 - ротаметр; 6 - касета; 7 - пневмокласифікуючий канал; 8 - відведення; 9 - вентилятор; 10 - циклон; 11 - приймальний стаканчик; 13 - лабораторний автотрансформатор (ЛАТР); 14 - ніжки; 15 - регулювальні опори

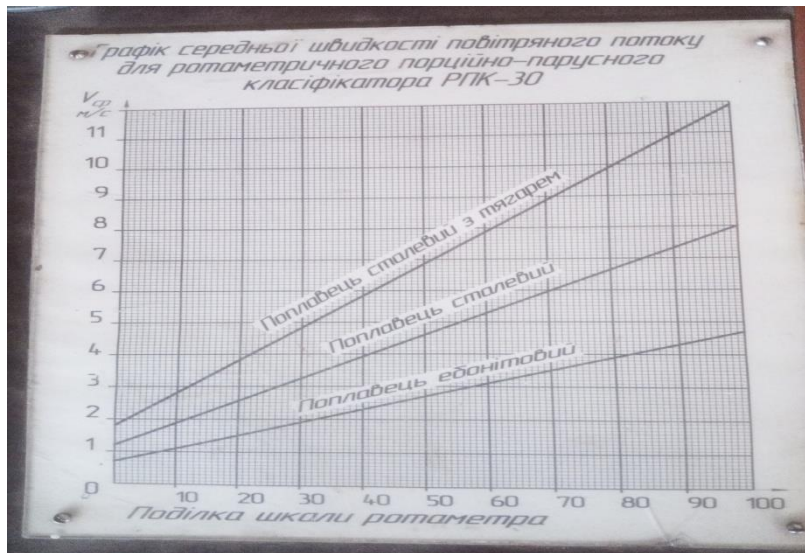


Рисунок 5. Тарувальний графік порційно-парусного класифікатора

Розраховують коефіцієнт парусності за формулою [10]:

$$K_n = \frac{g}{V_{II}^2} \quad (11)$$

Результати заносять до таблиці 1. В таблиці 1 представлені результати для швидкостей витання третинок насіння рицини. Такі ж данні виконують для коробочок і насіння рицини.

З метою технологічних вимог до процесу обрушення насіння рицини розроблено схему процесу, яка представлена на рис.6, що враховує розбіжність розмірних характеристик та поєднує дві операції – калібрування насіння та обрушення. На основі чого складено удосконалену схему технологічного процесу.

До установки для обрушення насіння рицини, з точки зору раціональності роботи, висувається ряд вимог: швидкість руху поверхні валків, величина зазору, що створює зусилля притискання (руйнування), а також висота падіння рушанки до щілини між валками, так як додаткове руйнування пошкоджує фракційний склад рушанки.

В існуючому обладнанні для обрушення насіння рицини [4,5,11,12] регулювання зазору не відбувалось з кількох причин: по – перше, валки для обрушення мали розміри такі ж як і валки для розмелу м'ятки, і встановлення додаткової пари підвищувало габарити та металоємність машини; по – друге, якщо калібрувати насіння перед обрушенням, то необхідні значні площі для пофракційного зберігання насіння. Зміна величини зазору впливає на процес обрушення наступним чином: збільшення приводить до значної кількості недообрушеного та цілого насіння в рушанці, а зменшення – до підвищення кількості важко відокремлюваної дрібної січки та олійного пилу, що

погіршує якість рушанки при її розділенні, тобто поділ насіння на фракції та їх окреме обрушення підвищує продуктивність обладнання та якість рушанки. Вище зазначене свідчить, що необхідно експериментальне дослідження процесу стосовно визначення зазорів між парами обрушуючих валків.

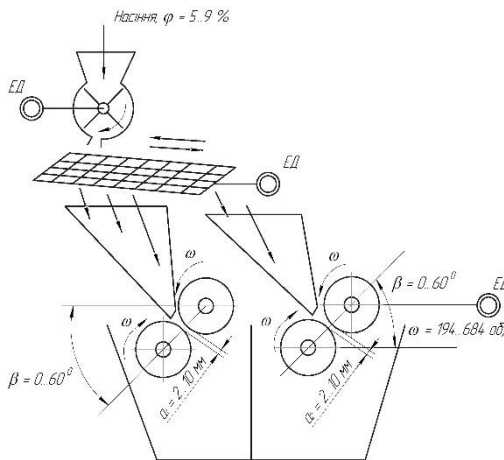


Рис. 6 Технологічна схема процесу обрушення насіння рицини



Рис. 7 Загальний вигляд експериментальної установки

В результаті пошукових дослідів також встановлено, що частота обертання вальців, що обрушують, значно впливає на якість обрушення. З її збільшенням зростає не тільки продуктивність обладнання, але кількість січки насіння. Аналізуючи отримані в ході досліджень дані, додатково встановлено, що кут розташування валків відносно горизонту значно впливає на якість рушанки, а саме відсоток січки у бік збільшення та на відсоток цілого насіння у бік зменшення.

Таким чином, можна визначити, що основними конструктивними параметрами, що впливають на процес обрушення насіння рицини, є: зазори між парами робочих органів a_1 , a_2 , швидкості пар робочих органів, кут розташування валків відносно горизонту.

Крім перерахованих конструктивних параметрів, які допускають можливість керування, на процес також впливає вологість насіння φ .

Кожний з розглянутих факторів, що змінюють повноту обрушення або фракційний склад рушанки не зв'язаний між собою. Ця умова вказує на можливість проведення багатофакторного експерименту і його оцінки на основі регресійного аналізу.

У загальному вигляді, проведення експериментальних досліджень проводиться в наступній послідовності [9]:

- вибір й обґрунтування критерію оптимізації, факторів і рівнів їхнього варіювання;
- вибір методики й плану проведення експерименту;
- проведення експерименту в лабораторних умовах;
- аналіз результатів експерименту й оцінка отриманої математичної моделі за допомогою критерію Фішера.

Для насіння рицини немає нормативної бази по визначенню складу рушанки, оскільки в процесі обрушення вона відрізняється від рушанок інших олійних культур наявністю більшої кількості роздавленого ядра. При стискуванні насіння в процесі обрушення імовірно як отримання цілого ядра так і подрібнення ядра з утворенням часток, які при подальшому транспортуванні розсипаються в січку, замащуючи при цьому лузгу.

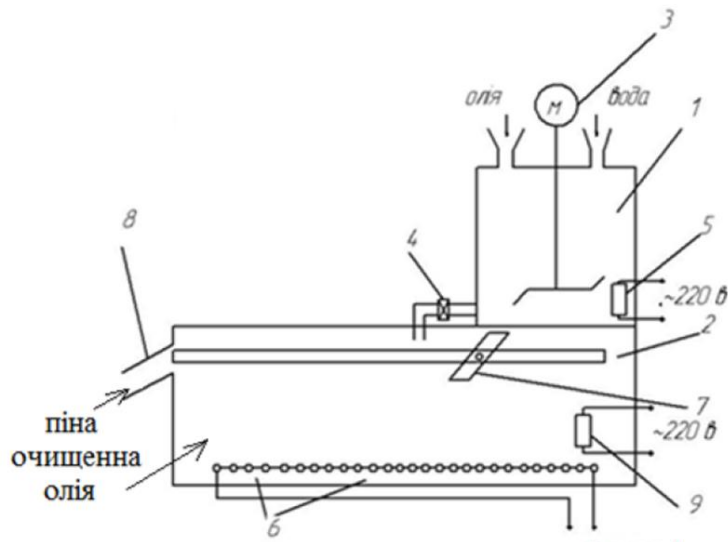
Для проведення дослідів розроблено та виготовлено експериментальну установку (рис.7). Для обраних факторів визначено область їх зміни. Не керовані параметри приймаємо сталими (Таблиця 1).

Таблиця 1 - Рівні та інтервали зміни факторів

Фактори	Умовні позначення	Основний рівень, X_{i0}	Інтервал зміни, δ	Верхній рівень, $X_{i\delta}$	Нижній рівень, $X_{i-\delta}$	Зіркова точка, $+\delta$	Зіркова точка, $-\delta$
Окружна лінійна швидкість x_1 , м/с,	x_1	0,35	0,1	0,45	0,25	0,55	0,15
Кут розташування валків відносно горизонту x_2 , градуси,	x_2	30	15	45	15	60	0
Відношення між зазором та середнім розміром насіння фракцій x_3 ,	x_3	0,5	0,15	0,65	0,35	0,8	0,2
Вологість насіння x_4 , %	x_4	7	2	9	5	11	3

Для очищення рицинової олії від фосфатидів попередньо здійснюють їх гідратацію при концентрації води 1,5 ... 2 %. Видалення гідратованих фосфатидів пов'язане з певними особливостями: велика в'язкість рицинової олії та її спроможність утримувати гідратовані фосфатиди в майже колоїдному стані. Крім того після очищення олія потребує видалення остатків води [14].

Технологічна схем електрофлотаційної установки для очищення рицинової олії наведена на рис.8.



1 – ємність для підігріву та змішування олії; 2 - флотаційна ємність; 3 – змішувач; 4 - випускний кран; 5, 9 - нагрівальні елементи; 6 - система електродів; 7 – скребок; 8 - отвір для видалення піни.

Рисунок 8. Технологічна схем електрофлотаційної установки для очищення рицинової олії

Свіжовижата неочищена рицинова олія подається до ємності 1 для підігріву та змішування олії, куди додається 1,5...2% води. Ця рідина ретельно переміщується змішувачем 3, та підігрівається до температури близько 100 °С за допомогою нагрівальних елементів 5. Підігріта та перемішана емульсія через випускний кран 4 надходить у флотаційну ємність 2. Для підтримки заданої температури в флотаційній ємності встановлено нагрівальний пристрій 9. Процес електрофлотації відбувається за допомогою встановленої системи електродів 6 у вигляді паралельно встановлених циліндрів. На електроди подається змінна висока напруга від 5...7 кВ зі струмом – 10 мА, що створює в міжелектродному просторі електричне поле великої напруженості. При цьому на електродах виникають парогазові бульбашки, які разом із домішками підіймаються на поверхню рідини. З поверхні рідини домішки видаляються скребком 7 для збору піни через отвір 8 для видалення піни. Вихід очищеної олії здійснюється через випускний кран. Контроль температури в ємностях 1, 2 відбувається за допомогою встановлених датчиків температури

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

При проведенні вимірювань геометричних характеристик коробочок і третинок рицини виявлено, що розміри окремих сортів мають практично однакові значення. Відповідно до сказаного, в процесі досліджень, сорти рицини, що досліджувалися було розбито на три групи: дрібні – до яких

відносилися сорти Олеся, Хортичанка, Хортицька 7; середні – відносилися сорти ВНИИМК-165, Гібрид ранній, Хортицька 1; великі – відносилися сорти Донська, Афродіта, Хортицька 3.

З урахуванням експериментальних залежностей та формул визначено характеристики варіаційних рядів коробочок і третинок сортів рицини (табл. 2...4).

Таблиця 2 – Характеристики варіаційних рядів для дрібної групи сортів рицини

Характеристики	Коробочки		Третинки		
	За довжиною	За шириною	За довжиною	За шириною	За товщиною
Вибіркова середня арифметична, \bar{x}	13,65	14,48	13,3	8,83	6,45
Дисперсія, S^{*2}	1,56	1,54	1,38	0,39	0,44
Середнє квадратичне відхилення, S^*	1,25	1,24	1,18	0,62	0,66
Коефіцієнт варіації, V	9,15	8,58	8,83	7,03	10,27
Розмах варіації, R ,	5,67	5,35	6,31	3,24	3,71
Асиметрія, A_s	-0,07	-0,55	0,56	0,18	-0,45
Екссес, E_x	-0,41	-0,16	1,39	-0,03	0,85

Таблиця 3 – Характеристики варіаційних рядів для середньої групи сортів рицини

Характеристики	Коробочки		Третинки		
	За довжиною	За шириною	За довжиною	За шириною	За товщиною
Вибіркова середня арифметична, \bar{x}	16,27	16,36	15,27	9,55	7,76
Дисперсія, S^{*2}	1,66	0,78	1,17	0,92	0,44
Середнє квадратичне відхилення, S^*	1,29	0,88	1,08	0,96	0,66
Коефіцієнт варіації, V	7,92	5,4	7,09	10,03	0,49
Розмах варіації, R ,	5,8	4,1	6	4,4	3,7

Асиметрія, A_s	-0,066	-0,82	0,69	0,09	-0,46
Ексцес, E_x	-0,45	0,52	1,93	-0,6	0,89

Таблиця 4 – Характеристики варіаційних рядів для великої групи сортів рицини

Характеристики	Коробочки		Третинки		
	За довжиною	За шириною	За довжиною	За шириною	За товщиною
Вибіркова середня арифметична, \bar{x}	18,78	17,44	18,38	10,39	8,84
Дисперсія, S^{*2}	1,82	1,3	1,14	0,5	0,26
Середнє квадратичне відхилення, S^*	1,35	1,14	1,07	0,71	0,51
Коефіцієнт варіації, V	7,19	6,54	5,81	6,83	5,76
Розмах варіації, R ,	6	5,0	6	3,5	3,1
Асиметрія, A_s	-0,067	-0,64	0,25	0,2	-0,56
Ексцес, E_x	-0,5	-0,009	1,71	-0,33	1,72

Розраховані значення параметрів вибіркової середньої арифметичної кожного варіаційного ряду (табл. 2...4) повинні бути враховані в технологічних машинах при розділенні коробочок рицини та луцені її третинок.

Центрування варіаційних рядів, що отримано в процесі досліджень (рис. 1...5) забезпечимо шляхом визначення закону нормального розподілення ряду згідно формули (10). Для цього необхідно врахувати результати характеристик варіаційних рядів розподілу геометричних параметрів компонентів вороху рицини (табл. 2...4). Результати розрахунків законів нормального розподілення варіаційних рядів розподілу коробочок за довжиною і шириною; третинок за довжиною, шириною і товщиною для різних сортів рицини наведено в табл. 5.

Таблиця 5 – Закони нормального розподілення варіаційних рядів розподілу: коробочок за довжиною і шириною; третинок за довжиною, шириною і товщиною для різних груп (сортів) рицини

Біометричні характеристики коробочок і третинок рицини		
Коробочки за довжиною		
Дрібна	Середня	Велика
$\Phi = 0,32 \cdot e^{\left(-\frac{x-13,65}{3,12}\right)}$	$\Phi = 0,31 \cdot e^{\left(-\frac{x-16,27}{3,32}\right)}$	$\Phi = 0,296 \cdot e^{\left(-\frac{x-18,78}{3,64}\right)}$
Коробочки за шириною		

Дрібна	Середня	Велика
$\Phi = 0,323 \cdot e^{\left(\frac{-x-14,48}{3,08}\right)}$	$\Phi = 0,454 \cdot e^{\left(\frac{-x-16,36}{1,56}\right)}$	$\Phi = 0,35 \cdot e^{\left(\frac{-x-17,44}{2,6}\right)}$
Третинки за довжиною		
Дрібна	Середня	Велика
$\Phi = 0,338 \cdot e^{\left(\frac{-x-13,3}{2,76}\right)}$	$\Phi = 0,37 \cdot e^{\left(\frac{-x-15,27}{2,34}\right)}$	$\Phi = 0,373 \cdot e^{\left(\frac{-x-18,38}{2,28}\right)}$
Третинки за шириною		
Дрібна	Середня	Велика
$\Phi = 0,644 \cdot e^{\left(\frac{-x-8,83}{0,78}\right)}$	$\Phi = 0,416 \cdot e^{\left(\frac{-x-9,55}{1,84}\right)}$	$\Phi = 0,562 \cdot e^{(10,39-x)}$
Третинок за товщиною		
Дрібна	Середня	Велика
$\Phi = 0,605 \cdot e^{\left(\frac{-x-6,45}{0,88}\right)}$	$\Phi = 0,605 \cdot e^{\left(\frac{-x-7,76}{0,88}\right)}$	$\Phi = 0,783 \cdot e^{\left(\frac{-x-8,84}{0,52}\right)}$

Закономірність розподілу вороху за швидкістю витання з урахуванням даних, що наведено в таблиці 6 та визначають масу відповідного вороху, що залишився. А потім, будують варіаційну криву розподілу масових фракцій насіння в діапазоні зміни швидкостей витання досліджуваної культури від $V_{\text{Вmin}}$ до $V_{\text{Вmax}}$. Для цього касету, засипавши визначений вид вороху (наприклад третинки рицини) масою 20 ... 30 г, встановлюють в РПК-30. За допомогою ЛАТРа, поступово збільшуючи частоту обертання колеса вентилятора, встановлюють поплавок ротаметра в положення $\Pi_{1\text{max}}$. В пневмокласифікуючому каналі встановлюється швидкість повітря $V_{1\text{max}}$ (верхня межа швидкості витання третинок рицини). З пневмокласифікуючого каналу, третинки рицини виносяться у циклон 10 і потрапляють в стаканчик 11 (рис 1а). У такому положенні поплавок утримують 10 ... 15 секунд, а потім плавно опускають, зупиняючи колесо вентилятора. Третинки, що залишилися у стаканчику, зважують для визначення залишкової маси $q_{\text{фр}}$. Порожній стаканчик встановлюють на місце. Потім виділяють інший ворох (коробочки), встановивши поплавок в положення $\Pi_{2\text{max}}$ (швидкість повітря в пневмокласифікуючому каналі - $V_{2\text{max}}$). Далі дослід повторюють для насіння рицини, утримуючи поплавок в розрахованому положенні однаково тривалість часу для кожного елементу вороха. Результати досліджень заносять до табл. 7.

Потім, за дослідними даними строять відповідні варіаційні криві, що представлено на рисунку 3, які показують залежність відсоткової кількості елементів вороху рицини, а саме коробочок, третинок і насіння в загальній масі цих елементів від швидкості витання таких компонентів.

Таблиця 6

Дослідні данні з визначення швидкості витання і коефіцієнта парусності третинок насіння рицини

Матеріал, що досліджується	Показання шкали ротометра Π		Швидкість витання V_n , м/с	Коефіцієнт парусності K_n , м ⁻¹
	min	max		
1	min	49	6,55	0,229
	max	85	10,55	0,088
2	min	51	6,70	0,219
	max	86	10,60	0,087
3	min	50	6,60	0,225
	max	84	10,50	0,089
4	min	52	6,85	0,209
	max	89	10,95	0,082
5	min	49	6,55	0,229
	max	83	10,49	0,089
6	min	51	6,70	0,219
	max	87	10,75	0,085
7	min	52	6,85	0,209
	max	88	10,80	0,084
8	min	51	6,70	0,219
	max	87	10,75	0,085
9	min	51	6,70	0,219
	max	87	10,75	0,085

10	min	52	6,85	0,209
	max	89	10,95	0,082

Таблиця 7

Дослідні данні розподілення вороху рицини за швидкостями витання

Назва вороху	Межі класу				Середня швидкість V_B витання м/с	Маса вороху $q_{фр}$, гр
	за шкалою ротометра		за величиною V_B , м/с			
	min	max	min	max		
третинки	49	89	6,55	10,95	8,75	6,8
коробочки	62	145	8,1	14,55	11,3	12,3
насіння	35	81	5,45	10,15	7,8	4,8

Середньозважені швидкості витання розраховували за формулою [10]:

$$v_{cp} = \frac{v_1 p_1 + v_2 p_2 + \dots + v_n p_n}{100} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i p_i}{100}, \quad (12)$$

де v - швидкість повітря, при якій відбувається виніс частинок i -ої фракції, м/сек;

p_i - вага часток i -ої фракції, що виносяться в осадову камеру при швидкості u % до ваги навіски.

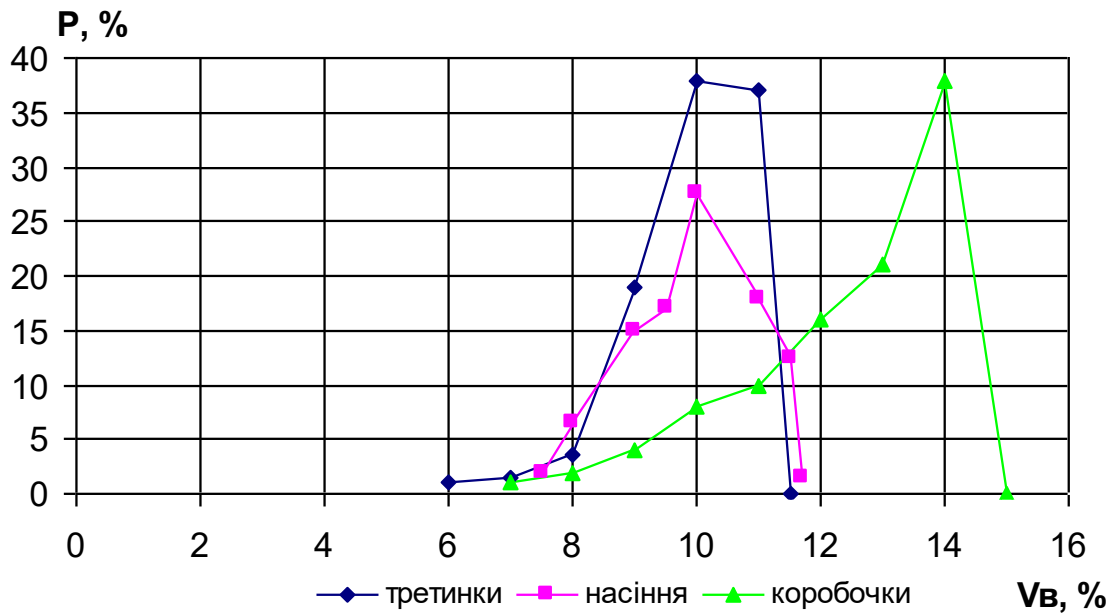


Рисунок 9. Варіаційні криві розподілення третинок, насіння і коробочок вороху рицини за середньою швидкістю витання

Аналізом залежностей (рис 9) встановлено, що варіаційні криві коробочок відрізняються від кривих третинок і насіння. За аеродинамічними властивостями така суміш буде розділена на приблизно 75%. Але, 25% відсотків суміші за аеродинамічними властивостями розділена не може бути, так як швидкості витання таких компонентів переважають. Тому необхідно застосування способів розділення суміші за іншими фізико-механічними властивостями. Суміш, які має в своєму складі третинки і насіння, розділена бути не може, так як швидкості витання є практично однаковими.

Після операції луцення коробочок вороху рицини отримуються третинки. Під час наступної операції, подрібнюється третинка для отримання чистого насіння. Виходячи з отриманих залежностей (рис. 9) так як за аеродинамічними властивостями не можна відділити чисте насіння від третинок, тому під час операції подрібнення третинок необхідно забезпечити максимальну ефективність процесу.

Перевірка гіпотези про адекватність отриманої математичної моделі проводилася за критерієм Фішера. Розрахунки показали, що модель адекватна на 95% рівні довірчої ймовірності [9].

Після перевірки на адекватність математичної моделі другого порядку визначаємо координати оптимуму й вивчаємо властивості поверхні відгуку на границях цього оптимуму. Вивчення поверхні відгуку проводимо за допомогою двовимірних перетинів.

ВИСНОВКИ

Геометричні характеристики. Встановлено, що розміри коробочок і третинок рицини значно залежать від сорту та варіюють у широкому діапазоні (довжина коробочок – 10,55–22,5 мм; ширина – 11,5–20,2 мм; довжина третинок – 10,86–22,5 мм; ширина – 7,36–12,3 мм; товщина – 4,8–10,2 мм). Визначені середні параметри для дрібних, середніх і великих фракцій, які необхідно враховувати у технологічних процесах переробки та конструкціях машин. Для кожного варіаційного ряду підтверджено закон нормального розподілу.

Аеродинамічні властивості. Встановлено діапазони швидкостей витання компонентів вороху рицини (на прикладі сорту Хортицька 7): насіння – 5,45–10,15 м/с, третинки – 6,55–10,95 м/с, коробочки – 8,1–14,55 м/с. Це дозволяє забезпечити ефективне розділення елементів вороху під час сепарації за аеродинамічними характеристиками.

Фізико-механічні процеси. Розроблено та перевірено на адекватність математичну модель процесу обрушення насіння рицини. Встановлено оптимальні параметри: лінійна швидкість валків – 0,37 м/с, кут розташування – 30,48°, відношення між зазором та середнім розміром насіння – 0,5, вологість – 6,98%. При цих умовах коефіцієнт обрушення становить 75,51 %. Виявлено недолік схеми – руйнування обрушеного ядра у дрібній фракції, що потребує удосконалення технології попереднім відділенням таких ядер.

Очищення рицинової олії. В результаті моделювання процесу очищення в електричному полі отримано числові значення швидкості осадження частинок (0,8 мм/с), які не залежать від початкової координати руху. Встановлено залежності швидкості осадження від напруги на електродах та вмісту води у часі. Це створює основу для розробки алгоритму інженерного розрахунку конструкційних параметрів флотаційної камери та підвищення ефективності очищення рицинової олії.

Таким чином, дослідження охопили геометричні, аеродинамічні, фізико-механічні та електротехнологічні аспекти, що дозволяє комплексно оптимізувати процеси переробки рицини та підвищити ефективність виробництва рицинової олії.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Nadikto V., Zhuravel D., Chebanov A., Verechaga O. Improving the efficiency of pressing the male of castor seeds in the screw press. Norwegian Journal

of development of the international Science. 2021. Vol. 59, № 1. pp. 48-53. DOI: 10.24412/3453-9875-2021-59-1-48-53.

2. Журавель Д. П., Чебанов А. Б. Обґрунтування аеродинамічних властивостей вороху рицини. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: Наукове фахове видання. – Мелітополь: ТДАТУ, 2021. Вип. 21, т. 2. С. 42-50. DOI: 10.31388/2078-0877-2021-21-2-42-50.

3. Журавель Д. П. Обґрунтування геометричних характеристик вороху рицини для процесів кормовиробництва. XI Міжнародна науково-технічна конференція «Технічний прогрес у тваринництві та кормо виробництві». НУБІП України, «ІМААВ НААН України, м. Київ, м. Глеваха, 3–22 жовтня 2022 року. С. 33-35.

4. Журавель Д. П. Технології переробки насіння рицини дворазовим пресуванням. Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі» ТДАТУ, м. Запоріжжя, 01-25 листопада 2022 р. С.93-96.

5. Журавель Д. П., Бондар А. М. Обґрунтування технологій отримання рицинової олії. Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі» ТДАТУ, м. Запоріжжя, 01-25 листопада 2022 р. С.77-79.

6. Журавель Д. П. Використання відновлюваної біосировини в енергетичних цілях. Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві: X Міжнародна науково-технічна конференція, 4-23 жовтня 2021 року: матеріали конференції. Глеваха-Київ. 2021. С. 28-30.

7. Журавель Д. П. Дослідження аеродинамічних властивостей компонентів насіння рицини. Сучасна інженерія агропромислових і харчових виробництв: Матеріали МНПК. Харків: ДБТУ, 2021. С. 411-413.

8. Дідур В. В., Журавель Д. П., Шокарев О. М., В'юник О. В., Комар А. С. Аналіз технологій отримання олії з олійних культур. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. Мелітополь: ТДАТУ, 2022. Вип. 12, том 3. 10 с. DOI: 10.31388/2220-8674-2022-3-18.

9. Zhuravel D. Determination of linear dimensions of boxes and thirds of individual castor varieties. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. Запоріжжя: ТДАТУ, 2023. Вип. 23, т. 1. С63-76. DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-1-63-76.

10. Журавель Д. П. Обґрунтування технологічного процесу обрушення насіння рицини для потреб кормовиробництва. Матеріали XII-ї Науково-технічної конференції «Технічний прогрес у тваринництві та

кормовиробництві», смт Глеваха Київської області – м. Київ, Україна, 2-20 жовтня 2023 року: матеріали конференції. Глеваха-Київ. 2023. С.69-71.

11. Журавель Д.П. Обґрунтування методу очищення біологічних олій в електричному полі. Збірник тез доповідей XIII-ї Науково-технічної конференції «Технічний прогрес у тваринництві та 24ормо виробництві», смт Глеваха Київської області – м. Київ, Україна, (01-18 жовтня 2024 року): матеріали конференції. Глеваха-Київ. 2024. С. 68-72.

12. Журавель Д.П., Дідур В.В. Моделювання процесу очищення рицинової олії в електричному полі. Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції. «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі» (01–25 листопада 2024 року). Запоріжжя, 2024. С. 98-104.

13. Журавель Д. П., Дідур В. В. Механіко-технологічні основи глибокої переробки насіння рицини на енергетичну біосировину: монографія. Запоріжжя: ТДАТУ, 2025. 275 с., іл.

РОЗДІЛ 2

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ УСТАНОВКИ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ПАЛИВНИХ БРИКЕТІВ

РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження є процес виготовлення паливних брикетів із рослинної сировини, зокрема відходів соняшнику, сої та льону, із використанням шнекового прес-екструдера та пристрою остаточного формування, що має систему відбору технічних олій.

Предметом дослідження є закономірності впливу технологічних і конструктивних параметрів пресового обладнання на якість готової продукції, енергетичні показники та ефективність відбору технічних олій.

Метою дослідження є зниження енергетичних витрат процесу, підвищення ефективності роботи обладнання, збільшення часу між плановими технічними обслуговуваннями, розширення спектра сировини та забезпечення високої якості паливних брикетів при одночасному відборі технічних олій.

Методи досліджень. Поставлені задачі вирішувались із використанням теоретичних та практичних методів: аналіз залежностей роботи різних типів пресового обладнання від характеристик сировини (вологість, вміст оліємісткої частки, походження), порівняння витрат енергії та якості готової продукції, а також експериментальні дослідження процесу виготовлення брикетів із оліємісткої сировини.

Основні результати досліджень:

Запропоновано методику порівняння основних видів пресового обладнання з розробленим шнековим пресом-екструдером, який забезпечує менші витрати енергії, більший час між плановими обслуговуваннями та високу якість продукції при невеликій собівартості.

Проведено аналіз роботи сучасного обладнання для виготовлення паливних брикетів та його здатності працювати з відходами провіювання соняшнику, сої та льону.

Встановлено залежність роботи обладнання від походження сировини та вмісту в ній олій.

Розроблено пристрій остаточного формування, який може працювати в парі зі шнековим пресом-екструдером, забезпечуючи ефективний відбір технічних олій та підвищення щільності й якості брикетів.

Ключові слова: брикетування, рослинна сировина, пресове обладнання, енерговитрати, технічна олія, щільність, температура.

ВСТУП

Тема виробництва паливних брикетів із біомаси є надзвичайно актуальною як для України, так і для світу. Постійне зростання цін на енергоносії, зокрема природний газ, стимулює населення та підприємства до переходу на альтернативні джерела енергії. В Україні це призвело до масового встановлення твердопаливних котлів, у яких здебільшого спалюються дрова. Така практика спричиняє значне навантаження на лісосмуги та довкілля, а також характеризується низькою ефективністю роботи обладнання та високим рівнем емісії шкідливих речовин.

Водночас виробництво паливних брикетів із відновлюваної сировини набуває дедалі більшої популярності завдяки високій щільності, калорійності та низькій собівартості продукції. Сільське господарство забезпечує широкий вибір сировини для цього процесу – відходи провіювання соняшнику, сої, льону, рапсу, коріандру та інших культур. Використання таких матеріалів дозволяє не лише отримати якісні брикети, але й технічну олію як додатковий продукт, що підвищує рентабельність виробництва.

Разом із тим, сучасне обладнання для виготовлення брикетів має низку недоліків: високе енергоспоживання, значну вартість, інтенсивне спрацювання деталей, проблеми з надмірним вмістом олій у сировині та перегрівом у теплий період року. Тому головним завданням сьогодні є розробка нових методів та обладнання, які забезпечать зниження енерговитрат, підвищення ефективності роботи, стабільність технологічного процесу та довговічність конструкцій.

Перспективним напрямом є створення пресів, що поєднують процес брикетування з одночасним віджимом технічної олії, мають менше енергоспоживання, забезпечують високу якість продукції та знижене зношування деталей. Такий підхід дозволяє комплексно вирішити проблеми галузі, сприяє розвитку альтернативної енергетики та відповідає сучасним вимогам до екологічності та економічності виробництва.

МЕТОДИ І ПРОГРАМА ДОСЛІДЖЕНЬ

Поставлені задачі вирішувались із використанням теоретичного та експериментального інструментарію. Теоретична частина включала аналіз залежностей роботи різних типів пресового обладнання від характеристик сировини, зокрема: витрат енергії залежно від типу сировини, її вологості, вмісту оліємісткої частки, виду обладнання та якості готової продукції.

Експериментальні дослідження проводилися протягом 2021–2025 рр. на базі кафедри ОПХВ імені професора Ф. Ю. Ялпачика Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного. Метою роботи було експериментальне підтвердження теоретичних досліджень та розробка промислового зразка шнекового прес-екструдера для виготовлення паливних брикетів із рослинної сировини.

Програмою досліджень передбачено:

Визначення вихідних технологічних даних для розробки промислового зразка прес-екструдера.

Виконання підбору окремих вузлів та механізмів (двигуни, редуктори, конструкція рами).

Встановлення послідовності проведення розрахунків конструкції.

Здійснення вибору компонування обладнання та розробка конструктивного рішення промислового зразка.

Удосконалення конструкції пресового обладнання для виготовлення паливних брикетів.

Визначення оптимальних кількісних показників відбору технічних олій при виготовленні паливних брикетів з відходів провіювання соняшнику.

Таким чином, програма досліджень поєднує теоретичний аналіз, конструкторські розрахунки та експериментальне підтвердження, що забезпечує комплексний підхід до створення ефективного пресового обладнання для виробництва паливних брикетів та технічних олій.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження ефективності роботи розробленого обладнання, проводилося при використанні в якості сировини відходів провіювання соняшнику з високою кількістю олії місткої частки, але даним обладнанням може перероблятися любий вид сировини, що містить частку олії.

На відміну від інших подібних пресів даний прототип має низькі енерговитрати та доволі високу продуктивність, при цьому простий в обслуговуванні та дуже надійний. При роботі зношені деталі легко піддаються відновленню шляхом наплавлення твердо сплавами. Розроблений прес-екструдер не примхливий до температури довкілля та може працювати як влітку за високих температур, так як має систему охолодження, а також може працювати в холодну пору року.

Основні технічні характеристики розробленого прес-екструдера для виготовлення паливних брикетів з олії місткої сировини приведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Технічні характеристики прес-екструдера з виготовлення паливних брикетів.

Показник	Величина
Потужність двигуна, кВт	11
Споживана потужність, кВт	до 7,5
Робоча температура формуючого органу (залежно від сировини), °С	до 85
Частота обертання шнеків, об/хв	71-85
Продуктивність (відходи соняшника), кг/год	125-150

Загалом, конструктивні ознаки розробленого шнекового преса-екструдера з пристроєм остаточного формування брикету, роблять можливим попереднє ущільнення, пресування і остаточне формування одним пристроєм. Таким чином, не має необхідності використовувати додаткове обладнання, що в свою чергу знижує енергозатрати. Більше того, через свої конструктивні особливості роботи, в процесі виготовлення брикетів можна використовувати різну сировину: масляничні культури – соняшник, соя, коріандр, льон, або змішані – тирса, торф, солома з оліє місткими культурами. Завдяки відсутності нагрівального елемента в зоні формування брикету значно зменшує показники по витратах електроенергії. При роботі з оліємісткими культурами, внаслідок контрольованого зниження температури в зоні інтенсивного стискання сировини, в значній мірі підвищується кількість віджатої технічної олії та її якість. Завдяки зменшенню надлишкової кількості олії в брикеті, поліпшуються екологічні показники при згоранні продукту.

Нами було розроблено і запатентовано шнековий прес-екструдер з пристроєм остаточного формування брикету, технологічна схема обладнання приведена на рис.1. Пристрій складається з двох камер, пристрою остаточного формування з функцією відбору технічних олій та системою охолодження, комплекту шнеків, які приводяться в рух через циліндричний редуктор від асинхронного двигуна. Секції пристрою остаточного формування з'єднані між собою за допомогою фланців з'єднанням зі здатністю регулювання зазору канавки відбору олій.

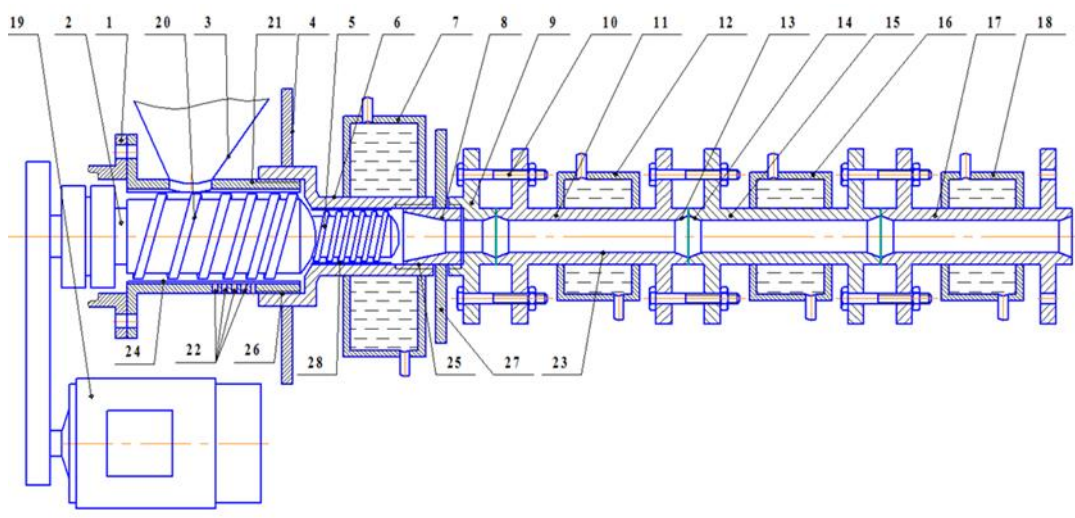


Рисунок 1. Технологічна схема прес-екструдера в парі з пристроєм остаточного формування:

1 – корпус з підшипниками; 2 – привідний вал; 3 – прийомний бункер; 4 – фіксуючий пристрій; 5, 20 – шнек; 6 – дожимна камера; 7, 12, 16, 18 – система охолодження; 8 – формуюча матриця; 9 – пристрій остаточного формування; 10 – болт; 11, 15, 17 – секції пристрою остаточного формування; 13, 14 – канавки для збору олій; 19 – електродвигун; 21 – підготовчо-пресуюча камера; 22 – отвори для первинного відводу олій; 23 – труба; 24, 28 направляючі ребра; 25, 26 – регульовальне різьбове з’єднання; 27 – рукоятка фіксатор.

Наявність системи охолодження рис.2 на пристрої остаточного формування, знижує температуру в зоні максимального стискання сировини та її формування, що запобігає пароутворенню в середині брикету, та підвищує якісні показники готового продукту.

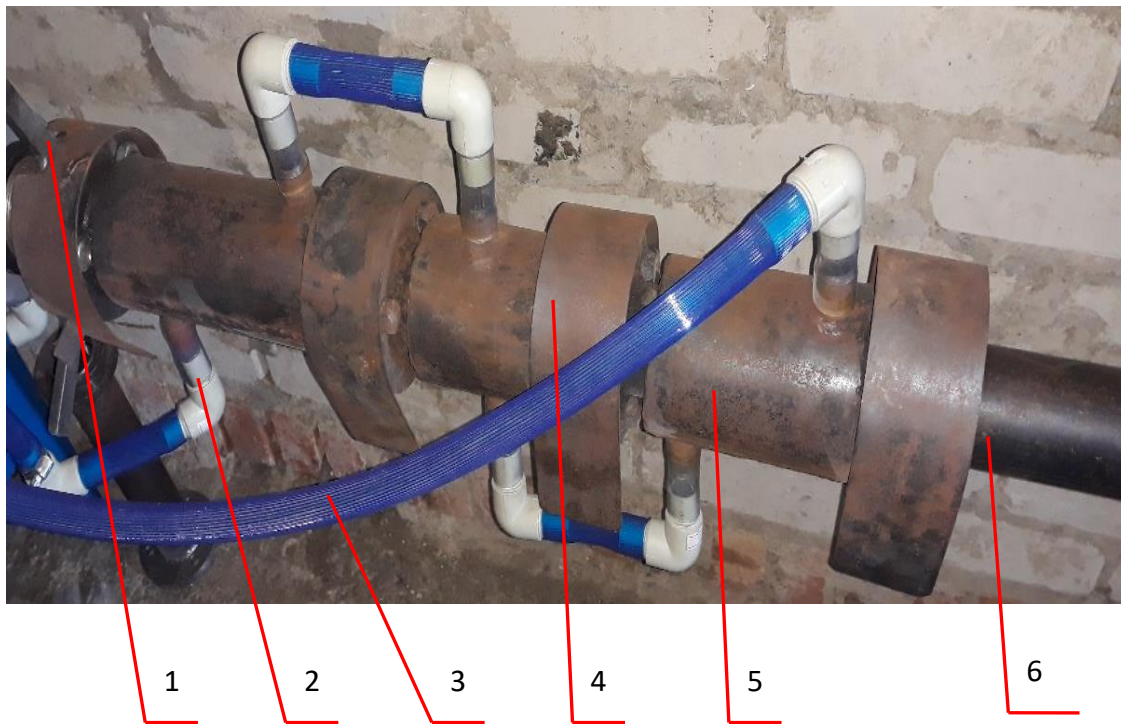


Рис. 2. Фрагмент робочих органів, до складу якого увійшов розроблений пристрій остаточного формування: 1 – матриця з регулятором тиску; 2 – вхідний патрубок охолодження; 3 – вихідний патрубок охолодження ; 4 – кожух системи відбору олії ; 5 – секція обладнана охолодженням; 6 – секція без охолодження.

На розробленому та запатентованому шнековому прес-екструдері для виготовлення паливних брикетів було проведено декілька етапів досліджень. Перший етап включав в себе розробку алгоритму налаштувань обладнання під конкретний вид сировини та виведення його на робочий режим. За допомогою частотного перетворювача Sako SKI600 380в для трифазних двигунів було визначено оптимальні оберти шнеків пресу, які склали 82 об/хв, при роботі з відходами провіювання соняшника в якості сировини. Також було підібрано оптимальний зазор в зоні регулювання підготовчої камери, який слав 3,5мм. Другий етап включав в себе серію дослідів з підбором оптимальної кількості секцій труб пристрою остаточного формування, його робочої температури та затрат електроенергії при пресуванні, при цьому повинно було забезпечуватися максимальне відділення технічних олій з готового продукту. В роботі досліджувалося обладнання, яке дозволило б забрати з процесу виготовлення паливних брикетів, при роботі з сировинами, які містять надлишкову частку олій додаткове обладнання.

Всі досліді проводилися з використанням однорідної сировини та завчасно виведеному на робочий режим обладнанні та заносилися в таблицю 2.

Таблиця 2

Кількісні показники

Кількість секцій	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Загальна довжина пристрою, мм	245	445	690	935	1180	1425	1670	1915	2160
Кількість олії при 40°C	0,1	0,5	0,7	1,2	1,5	2	2,6	3	3,1
Кількість олії при 50°C	0,3	0,8	1,6	2	2,3	2,5	3	3,5	3,7
Кількість олії при 60°C	0,5	1,1	2,3	3	3,2	4	4,6	4,9	4,9
Кількість олії при 70°C	0,7	1,7	2,6	3,3	3,7	4,5	5,1	5,5	5,2
Кількість олії при 80°C	0,8	1,8	2,8	3,6	4,1	4,8	5,2	5,6	5,2
Кількість олії при 90°C	0,7	1,6	2,4	3,2	3,7	4,5	5	5,4	5,1

Вихід олії визначили за рівнянням (1):

$$V_o = \frac{m_m}{m_o} \cdot 100, \quad (1)$$

де V_o - вихід технічних олії, %;

m_o – маса віджатої технічної олії, кг;

m_m – маса брикетів, кг.

По отриманих даним дослідів побудували графік рис.3

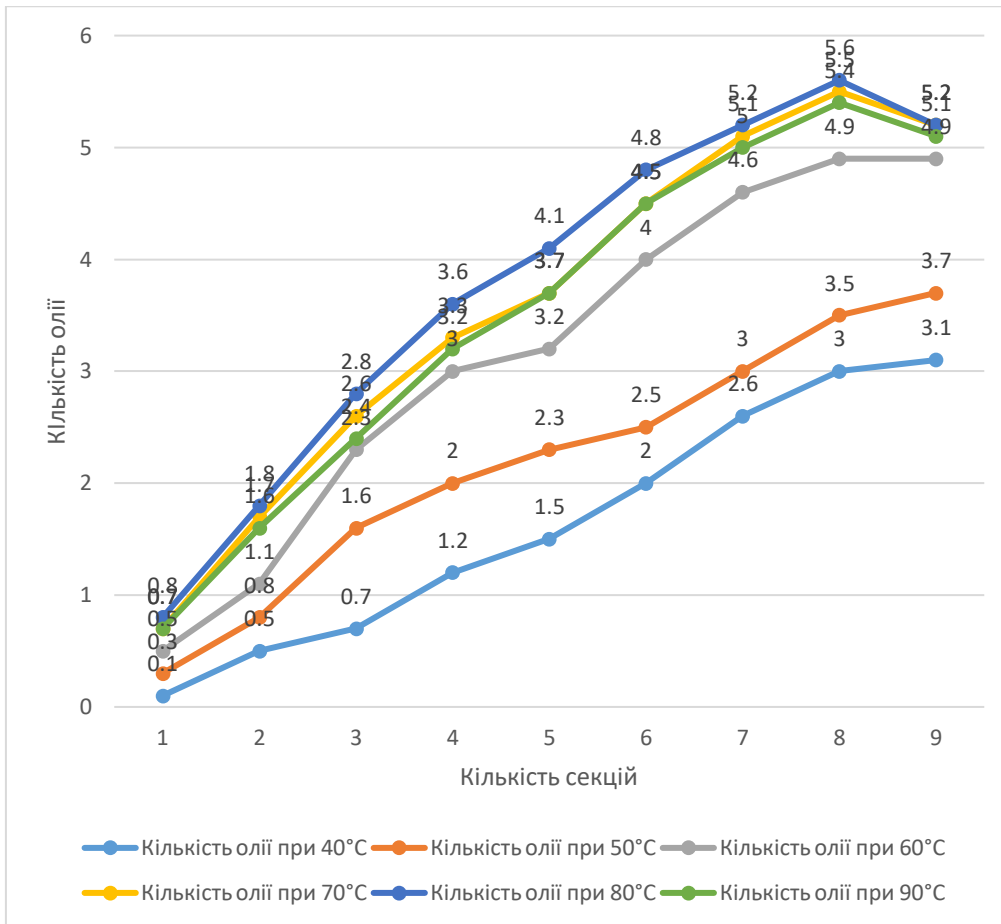


Рис. 3. Графік залежності відбору технічної олії % при виготовленні 100кг брикету, від зміни кількості секцій труб пристрою остаточного формування брикету та при різних температурних режимах роботи.

Завдяки подовженій системі пристрою остаточного формування вдалося збільшити тиск на сировину саме на цьому етапі та добитися максимального відбору технічних олій не в першій та другій камерах, як у стандартних прес-екструдерах, де максимальне тертя, а вже на етапі формування де тертя мінімальне. За рахунок чого інтервал між плановими замінами шнеків склали від 100 до 120т в залежності від структури сировини, на відміну від аналогів де від 25т. Подовжена конструкція пристрою дала змогу також максимально збільшити час перебування сировини в зжатому стані, що в свою чергу значно підвищило щільність готового продукту. Завдяки невеликим розмірам секцій пристрій легко піддається очистці після закінчення роботи.

Конструкція розробленого прес-екструдера передбачає систему охолодження в найбільш гарячих частинах обладнання, це дає змогу вивести обладнання на режим роботи без пароутворення що в цілому змінює підхід до самого процесу пресування та дозволяє: по-перше працювати з сировиною з більшою вологістю, по-друге виготовляти паливні брикети без отвору дуже високої щільності, по-третє одночасно відбирати технічні олії в потрібній нам кількості на певних етапах формування брикету поліпшуючи

якісні та екологічні показники продукту. На рис.4 ображено отримані паливні брикети з відключеною системою охолодження і без відбору технічної олії та отримані паливні брикети з відрегульованою системою охолодження на показнику 80°C та при відборі олії в розмірі 5,6кг/100кг брикету.



а)

б)

Рисунок 4. Отримані паливні брикети при зміні режимів роботи.

Під час дослідів ми визначили також об'ємну щільність отриманих брикетів з відключеною системою охолодження та залученням системи охолодження. Щоб визначити об'ємну щільність брикету за допомогою штангеля провели вимірювання його довжини, ширини, висоти та розраховали об'єм, а також провели зважування на електронних вагах та визначили його щільність за рівнянням 2:

$$\rho = m / V, (2)$$

де m – маса брикету, г;

V – об'єм

З отриманих розрахунків ми бачимо, що щільність паливного брикету на 25% більша в зразку де ми використовували систему контрольованого охолодження та складає 1,3 т/м³.

Таблиця 2. Показники щільності брикету за різних температур робочого органу

Кількість секцій пристрою	8	8	8	8	8	8
Робоча температура °С	40	50	60	70	80	90
Щільність брикету т/м ³	0,6	0,75	1	1,2	1,3	1,25

ВИСНОВКИ

Таким чином, проведені дослідження та експериментальна перевірка розробленого пресового обладнання підтвердили його ефективність і перспективність. Застосування сукупності конструктивних та технологічних ознак забезпечує:

Виробництво паливних брикетів з підвищеною тривалістю горіння завдяки високій щільності та відсутності отворів, зі зниженим вмістом рідких токсичних речовин.

Отримання високоякісної технічної олії з допустимим показником кислотності без додаткових етапів підготовки, що підвищує рентабельність виробництва.

Зниження енерговитрат до 40 кВт/т готової продукції завдяки унікальній конструкції камер та шнеків, відсутності додаткового обладнання та нагрівальних елементів.

Збільшення міжремонтного часу обладнання у 2 рази та зменшення витрат на очищення пристрою остаточного формування.

Підвищення ефективності відбору технічних олій безпосередньо на етапі формування брикету завдяки секційній системі остаточного формування, що дозволяє контролювати процес на різних стадіях.

Розширення сировинної бази та можливість використання відходів провіювання соняшнику й інших культур з високим вмістом олії. Оптимальним режимом роботи для таких відходів є використання восьми секцій при температурі робочих органів 80 °С.

Стабільну роботу обладнання в теплий період року завдяки системі охолодження, що контролює температурні показники як сировини, так і робочих органів, знижуючи їх зношування.

Зниження собівартості продукції та підвищення економічної ефективності виробництва за рахунок паралельного отримання технічної олії, продаж якої перекриває витрати на сировину.

Отримані результати свідчать, що розроблений прес-екструдер є перспективним для використання у регіонах з великими обсягами вирощування олійних культур, забезпечує комплексну переробку сировини та підвищує якість і рентабельність виробництва паливних брикетів.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Самойчук К. О., Самохвал В. А. Обладнання для виготовлення паливних брикетів та їх недоліки // Новації в технології та обладнанні

готельно-ресторанних, харчових і переробних виробництв: друга міжнародна науково-практична інтернет-конференція, 23 листопада 2021 р. : [матеріали конференції] / під заг. ред. В.М. Кюрчева. – Мелітополь : ТДАТУ, 2021. С. 34-35.

2. Самойчук К. О., Самохвал В. А. Теплотворна здатність палива для переробних виробництв // Новації в технології та обладнанні готельно-ресторанних, харчових і переробних виробництв: друга міжнародна науково-практична інтернет-конференція, 23 листопада 2021 р. : [матеріали конференції] / під заг. ред. В.М. Кюрчева. – Мелітополь : ТДАТУ, 2021. С. 58-60.

3. Самойчук К. О., Самохвал В. А. Розробка міні-лінії для виготовлення паливних брикетів // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету : наукове фахове видання / ТДАТУ: гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев.- Мелітополь: ТДАТУ, 2021. – Вип. 21, т. 1.- с.152-159

4. Самойчук К.О., Самохвал В.А. Перспективи використання біопалива з рослинної сировини. Матеріали шостої міжнародної науково-практичної конференції «Інтеграційні та інноваційні напрями розвитку харчової індустрії» (3-4 листопада 2022 р). — вид. ФОП Гордієнко Є.І., Черкаси, 2022 С. 158 -161.

5. Samoichuk K. O., Samohval V. A. Equipment for production of solid biofuel from vegetable raw materials. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасна інженерія агропромислових і хачових виробництв» (24-25 листопада 2022 р.) – Харків, 2022. – С

6. Патент а 202007249 Україна, МПК (2006): В30В.11/00,В30В 9/00,В27N 5/00 Шнековий прес-екструдер для отримання брикетів / Самохвал В.А.: заявник і патентовласник Самохвал Віталій Анатолійович – и 202007249: заявл. 13.11.2020: опубл. 18.05.2022, Бюл. №20

7. Самойчук К.О., Самохвал В.А. Перспективи використання біопалива з рослинної сировини. Матеріали шостої міжнародної науково-практичної конференції «Інтеграційні та інноваційні напрями розвитку харчової індустрії» (3-4 листопада 2022 р). — вид. ФОП Гордієнко Є.І., Черкаси, 2022 С. 158 -161.

8. Samoichuk K. O., Samohval V. A. Equipment for production of solid biofuel from vegetable raw materials. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасна інженерія агропромислових і хачових виробництв» (24-25 листопада 2022 р.) Харків, 2022. С. 150-152. (ТЕЗИ)

9. Самохвал В.А., Самойчук К. О. Виготовлення паливних брикетів на пресі екструдерного типу. III Міжнародна науково-практична конференція молодих учених «Технічне забезпечення інноваційних технологій в

агропромислового комплексу» (24 лютого 2023). ТДАТУ, 2023. 11. http://www.tsatu.edu.ua/tsst/wp-content/uploads/sites/6/samohval_23.pdf

10. Самойчук К. О., Самохвал В.А. Підвищення ефективності виробництва паливних брикетів з оліємістких сировин в шнекових прес-екструдерах. Збірник тез доповідей XIX Міжнародної наукової конференції

«Раціональне використання енергії в техніці. TechEnergy 2023» (18-19 травня 2023 року). Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2023. С. 56-59. (ТЕЗИ)

11. Самохвал В. А., Самойчук К. О. Дослідження ефективності роботи обладнання для інтенсифікації відтискання технічних олій в гвинтових прес-екструдерах для виготовлення паливних брикетів. Вип. 13. Т.1. 16. DOI: 10.31388/2220-8674-2023-1 -16

12. Самохвал В. А., Самойчук К. О., Червоткіна О.О. Дослідження ефективності роботи системи охолодження при інтенсифікації відтискання технічних олій в гвинтових прес-екструдерах для виготовлення паливних брикетів. // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету : наукове фахове видання / ТДАТУ: гол. ред. д.т.н., проф. В. М.Кюрчев.- Мелітополь: ТДАТУ, 2023. – Вип. 23, т. 2.- с.33-45.

13. Червоткіна О.О., Фучаджи Н.О., Паляничка Н.О., Самохвал В.А. Вплив різних параметрів на процес гранулювання рослинної сировини та якість гранул. // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету : наукове фахове видання / ТДАТУ: гол. ред. д.т.н., проф. В. М.Кюрчев.- Мелітополь: ТДАТУ, 2023. – Вип. 23, т. 2.- с.103-123.

14. Самохвал В.А., Самойчук К.О., Дослідження роботи пристрою остаточного формування брикету з здатністю відбору олій при виготовленні паливних брикетів на гвинтових прес-екструдерах. (прийнято на публікацію)

15. Самохвал В. А., Самойчук К. О., Червоткіна О.О. Багатосекційний універсальний пристрій остаточного формування паливних брикетів. Збірник тез та доповідей Міжнародна науково-практична конференція Пріоритетні напрямки розвитку науки, освіти, технологій та інновації діяльності в Україні. (Полтава 12 квітня 2024р), 71с.

16.. Самохвал В. А., Самойчук К. О., Камера дожиму з системою контролю температури шнекового прес екструдера для виготовлення паливних брикетів: Міжнародна науково-практична конференція Технічний прогрес в АПВ – Харків: 498с.

17. Самохвал В. А., Самойчук К. О. Визначення кількосних показників віджиму технічних олій при використанні пристрою остаточного формування паливного брикету. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання /

ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. Запоріжжя: ТДАТУ, 2024. Вип. 24, т. 2. 313 с.

18. Самохвал В. А., Самойчук К. О. Дослідження процесу формування паливних брикетів з відходів соняшнику. VIII Міжнародна наукова конференція «Здобутки та досягнення прикладних та фундаментальних наук XXI століття» (22 листопада 2024 року) Біла Церква, 2024. С. 277-280..

19. Самохвал В. А., Самойчук К. О. Дослідження процесу виготовлення паливних брикетів з відходів провіювання соняшнику. Збірник тез III Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції молодих вчених 15 листопада 2024 р. Дніпро: ДДАЕУ, 2024.

20. Самохвал В.А., Самойчук К. О. Виготовлення паливних брикетів на пресі екструдерного типу. III Міжнародна науково-практична конференція молодих учених «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі» (24 лютого 2023). ТДАТУ, 2023. 11. http://www.tsatu.edu.ua/tsst/wp-content/uploads/sites/6/samohval_23.pdf

21. Самохвал В. А., Самойчук К. О. Дослідження роботи шнекового прес-екструдера в парі з багатосекційним пристроєм формування паливних брикетів. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання. / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. – Запоріжжя: ТДАТУ, 2025.04.30. Вип. 15, т. 1. 354 с. 114-120с

22. Дослідження процесу ущільнення відходів провіювання соняшнику з використанням змінних шнеків. "Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. Запоріжжя: ТДАТУ, 2024. Випуск 24, том 25. № 2 (2025): 220-227с

23. Самохвал В. А., Самойчук К. О., Червоткіна О. О., Підвищення ефективності роботи обладнання для виробництва паливних брикетів з оліємісткої сировини. «Інжиніринг технологій та технічних систем агропромислового комплексу» Збірник тез Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених, (1 грудня 2023р.). Дніпро. ДДАЕУ. 2023. 267с. 38-40

24. Samokhval, V., Samoichuk, K., Kholobtseva, I., Tymchak, D., Sova, N. Increasing the Efficiency of Fuel Briquettes Production on a Screw Press. Lecture Notes in Mechanical Engineering, pp. 213–223. 2025. DOI: 10.1007/978-3-031-95218-0_19

РОЗДІЛ 3

ЗБЕРІГАННЯ ЯГІД ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЗАМОРОЖУВАННЯ ТА ОХОЛОДЖЕННЯ

РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження є процеси зберігання швидкопсувної рослинної продукції, зокрема заморожування ягід та вакуумне охолодження плодів черешні.

Предметом дослідження є технологічні та конструктивні параметри обладнання для заморожування й охолодження, а також закономірності впливу режимів цих процесів на якість ягід і плодів при короткостроковому зберіганні.

Метою дослідження є збереження показників якості ягід та плодів під час зберігання шляхом застосування сучасних технологій заморожування та вакуумного охолодження, а також розробка й обґрунтування оптимальних режимів роботи обладнання для подовження термінів зберігання продукції з високою якістю.

Методи досліджень. Експериментальні дослідження проводилися згідно з чинними методиками та галузевими стандартами для оцінки фізико-механічних, біохімічних та мікробіологічних змін ягід і плодів.

Використовувались спеціально розроблені дослідні установки для заморожування та вакуумного охолодження, лабораторні аналізи, методи математичної статистики та планування багатofакторних експериментів.

Теоретичні дослідження параметрів вакуумного охолоджувача проводилися з використанням положень термодинаміки, диференційного та інтегрального числення, а оптимізація параметрів – за методикою планування екстремального експерименту.

Основні результати досліджень:

Розроблено експериментальну установку для вакуумного охолодження плодів, овочів та ягід, яка дозволяє регулювати температуру та тиск у широких межах.

Встановлено, що найбільш раціональним режимом вакуумного охолодження плодів черешні є охолодження при тиску 56325 Па до температури 3 °С із внесенням вологи у камеру охолодження.

Підтверджено, що застосування процесу швидкого заморожування ягід дозволяє зберегти їхні фізико-механічні та біохімічні показники, забезпечуючи високу якість продукції протягом усього періоду зберігання.

Ключові слова: заморожування, ягоди, вакуумне охолодження, плоди черешні, температура, тиск, якість продукції.

ВСТУП

Швидке охолодження та шокова заморозка по праву визнані найкращими способами зберігання свіжої продукції. Вони забезпечують збільшення терміну придатності, збереження поживних і смакових властивостей, що високо цінується як виробниками, так і споживачами харчових продуктів. Завдяки швидкому заморожуванню свіжої харчової сировини зберігається її біологічна та вітамінна цінність, активність як рослинного, так і тваринного походження. При застосуванні технології шокової заморозки кристали льоду залишаються дрібними та щільними, що сприяє збереженню структури продукції та її високої якості після розморожування.

Особливо актуальним є питання охолодження та зберігання плодів черешні, які мають найкращі смакові якості відразу після збирання. Свіжозібрані плоди швидко втрачають вологу, вітаміни, ароматичні та поживні речовини, що призводить до зниження товарного стану, скорочення терміну реалізації та зменшення ціни. При температурі 30 °С вже через 6 годин після збору черешня втрачає половину своєї якості. Тому для збереження врожаю необхідно забезпечити швидке попереднє охолодження, сортування та пакування. Навіть найбільш стійкі сорти можуть зберігатися не більше 14 діб за дотримання відповідних умов, тоді як довготривале зберігання у холодильниках погіршує смак продукції.

Одним із найбільш перспективних методів є вакуумне охолодження, яке базується на принципі випарного охолодження. Його ефективність досягається завдяки скороченню часу технологічного процесу та зниженню тиску, що зменшує температуру кипіння води й забезпечує швидке охолодження плодів та овочів із високим вмістом вологи.

Програмою досліджень передбачено:

розробку методики досліджень;

проведення виробничих випробувань вакуумного способу охолодження плодів черешні та їх короткотривалого зберігання;

обробку та аналіз отриманих результатів із подальшим оформленням звіту.

Таким чином, дослідження спрямовані на пошук оптимальних технологій охолодження та зберігання швидкопсувної продукції, що

дозволить зберегти її якість, поживну цінність та підвищити економічну ефективність виробництва.

МЕТОДИ І ПРОГРАМА ДОСЛІДЖЕННЯ

Поставлені задачі вирішувались із використанням теоретичного та експериментального інструментарію. Теоретичні дослідження включали аналіз переваг технології шокової заморозки порівняно з традиційним охолодженням у холодильних камерах, а також вивчення процесів вакуумного охолодження продукції. Експериментальні дослідження проводилися для підтвердження ефективності розроблених технологій та обладнання.

Програмою досліджень передбачено:

порівняння традиційного способу заморожування на стелажах із технологією шокової заморозки, що забезпечує:

- зменшення втрат продукту у 2–3 рази;
- скорочення часу заморозки у 3–10 разів;
- зменшення виробничих площ у 1,5–2 рази;
- скорочення чисельності персоналу на 25–30%;
- зменшення терміну окупності на 15–20%.

проведення експериментальних досліджень із використанням модернізованого обладнання для зберігання ягід;

розробку та випробування установки для вакуумного охолодження плодів черешні;

визначення параметрів і режимів вакуумного охолодження та їх впливу на якість продукції;

аналіз наукових досліджень вітчизняних та закордонних учених щодо вакуумного охолодження різних видів продукції.

База досліджень. Робота виконувалась у 2021–2024 рр. на базі Науково-дослідного саду ТДАТУ та кафедри «Обладнання переробних і харчових виробництв ім. професора Ф. Ю. Ялпачика» Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного (м. Мелітополь, Запорізька область). Використовувалась виробнича база ВАТ «Мелітопольська черешня». У дослідженнях застосовували плоди черешні сорту «Мелітопольська чорна», внесеного до реєстру сортів України.

Методика експериментів. Товарна обробка плодів проводилась відповідно до вимог ГСТУ 01.1-37-162:2004.

Охолодження здійснювалось у розробленій вакуумній камері (подана заявка на патент на корисну модель «Установка для вакуумного охолодження рослинної сировини»).

Для зберігання використовувалась холодильна камера КХР-6 при температурі 0–7 °С.

Змінними параметрами були: тиск у камері (Па), температура повітря (°С), тривалість охолодження (хв).

Управління системою здійснювалось психрометричним термографом/терморегулятором, що забезпечував зупинку процесу при заданій температурі.

Оцінка впливу режимів охолодження проводилась за такими показниками: тривалість охолодження, втрата вологи (%), температура продукту після охолодження (°С), органолептичні та фізико-механічні характеристики.

Всі заміри виконувались у трикратній повторності.

Статистична обробка результатів здійснювалась за допомогою ПК із використанням програми Excel.

Теоретичні дослідження. У 2024 р. проведено аналіз параметрів і режимів роботи установки для вакуумного охолодження плодів черешні. Вивчено досвід закордонних учених:

F. C. Schmidt, A. C. C. Silva, E. Zanoelo, J. B. Laurindo – дослідження кінетики вакуумного та повітряного охолодження курячих грудок;

Chao hui Feng, Zhihang Zhang, Liana Drummond, Da-Wen Sun – порівняння вакуумного охолодження ковбасних виробів із зануренням у рідину;

Enhai Liu, Xiaobo Hu, Shengyong Liu – моделювання процесу вакуумного попереднього охолодження листового салату.

Результати цих досліджень підтвердили переваги вакуумного охолодження над традиційним повітряним охолодженням, зокрема значне скорочення часу процесу, однорідність охолодження та можливість інтеграції технології у виробничі процеси харчової промисловості.

Таким чином, програма досліджень поєднує теоретичний аналіз, експериментальні випробування та порівняння сучасних технологій охолодження, що дозволяє обґрунтувати параметри та режими роботи установки для вакуумного охолодження плодів черешні та визначити перспективні напрями її застосування у харчовій промисловості.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Ягоди належать до швидкопсувної сільськогосподарської продукції, зберігання якої є складним завданням, але водночас критично важливим для отримання кінцевого прибутку. Найбільш поширеним способом збереження свіжих ягід є використання холоду. Технологія шокової заморозки з флюїдизацією. У спеціальних швидкоморозильних апаратах застосовується явище флюїдизації («псевдозрідження»), коли шар ягід або шматочків продукту на сітчастому конвеєрі під дією інтенсивного вертикального потоку повітря поводить як рідина. Це забезпечує вирівнювання шару та його перемішування, що сприяє рівномірному охолодженню. Заморожування відбувається при температурах $-35 \dots -45$ °С, після чого продукцію доводять до -18 °С для тривалого зберігання. Чим швидше проходить процес, тим дрібніші кристали льоду утворюються, що дозволяє краще зберегти структуру та якість продукту.

Розроблені апарати та їх класифікація. На основі аналізу існуючих і нових флюїдизаційних апаратів складено класифікацію за:

- механізмом створення флюїдизаційного шару;
- конструкцією виконавчих органів;
- способом переміщення продукції у зоні обробки.

Виділено три напрями технологічної дії семіфлюїдизаційних апаратів:

Переохолодження продукції за рахунок конвективного теплообміну потоком холодоносія.

Переохолодження за рахунок кондуктивного теплообміну при контакті з масою снігової шуби або тонкоподрібненої криги.

Комбінований теплообмін – конвективний та кондуктивний одночасно.

Віброконвеєрні установки. Розроблена схема віброхвильової семіфлюїдизаційної машини поєднує стрічковий транспортер та вібраційну технологічну систему. Вібраційні приводи, умонтовані у вальці, створюють просторові коливання, що забезпечують безперервний рух продукції, її зважений стан та рівномірний контакт із холодоносієм. Це дозволяє інтенсифікувати тепломасообмін, зменшити внутрішнє тертя та забезпечити пошарове перемішування.

Збереження якості ягід. Для збереження зовнішніх і внутрішніх властивостей ягід важливим є правильний вибір та підготовка сировини. Зм'яті або перезрілі ягоди утворюють масу низької якості, недозрілі – втрачають смак і аромат. Чорна та червона смородина є цінним джерелом аскорбінової кислоти, проте після заморожування відмічається зниження її вмісту, а також розчинних твердих речовин і титрованих кислот. Для

збереження корисних речовин необхідне швидке заморожування, яке запобігає руйнуванню клітинної структури.

Вакуумне охолодження черешні. Для експериментів було використано три районовані сорти черешні. Плоди охолоджували у вакуумній камері при тиску 29, 44 та 59 кПа, знижуючи температуру з 25 °С до 2 °С. Час охолодження становив відповідно 40, 45 та 50 хвилин. Найнижча швидкість охолодження спостерігалась при тиску 29 кПа. Вакуумне охолодження забезпечило рівномірний розподіл температури як на поверхні, так і всередині плодів. Для порівняння, при традиційному охолодженні у холодильній камері поверхня плодів охолоджувалась за 80 хвилин, тоді як серцевина – за 198 хвилин. Це доводить значну перевагу вакуумного охолодження над традиційним методом.

Таким чином, результати досліджень підтверджують ефективність технологій шокової заморозки з флюїдизацією та вакуумного охолодження для збереження якості ягід і плодів, що дозволяє подовжити термін їх реалізації, зменшити втрати та забезпечити високу харчову цінність продукції.

ВИСНОВКИ

Використання технології флюїдизації (псевдоожиження) під час шокової заморозки забезпечує рекордно короткий час охолодження продукції, запобігає її злипанню та дозволяє зберегти структуру. Найбільш ефективно такі камери застосовуються для дрібної продукції – ягід, нарізаних овочів і фруктів, бобових тощо. Заморожені таким способом продукти мають мінімальні втрати, високу якість та добре фасуються.

Розроблено експериментальну установку для вакуумного охолодження плодів, овочів та ягід, яка дозволяє регулювати температуру та тиск у широких межах. Встановлено, що найбільш раціональним режимом охолодження плодів черешні є тиск 56325 Па та температура 3 °С із внесенням вологи у камеру охолодження в лотках.

На основі аналізу наукових досліджень підтверджено переваги вакуумного охолодження як перспективної технології, що забезпечує швидке охолодження продукції, зменшення втрат ваги через випаровування вологи та збереження якісних показників на значно вищому рівні порівняно з традиційним охолодженням повітрям.

Інтегрування технології вакуумного охолодження у харчову та переробну промисловість дозволяє скоротити час виробничих процесів і

підвищити якість готової продукції. Це підтверджує актуальність теми та її практичну значимість.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на визначення теоретичних закономірностей процесу вакуумного охолодження плодів черешні, удосконалення методики та розробку експериментальних установок для лабораторних випробувань, а також на інтеграцію технології у сучасні холодильні камери.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Пристрій вібро-шугового підморожування: пат. 146083 Україна: МПК F25D 13/06, F25D 17/06 (2006.01). № u2020 04962; заявл.03.08.2020; опубл. 20.01.2021; Бюл. № 3.

2. Kiurchev S., Valentyna V., Kiurcheva L., Hutsol T., Semenyshyna I. Study of changes incurrant during fast freezing/ International Scientific and Practical Conference on Environment.Technology. Resources, ETR 2021Rezekne17 June 2021 до 18 June 2021 p. 113 – DOI 11610.17770/etr2021vol1.6539.

РОЗДІЛ 4

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ГРАНУЛЮВАННЯ ВТОРИННОЇ СИРОВИНИ СОКОВОГО ВИРОБНИЦТВА

РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження є процес грануляції відходів сокового виробництва, зокрема морквяного жому, та їх взаємодія з робочими поверхнями прес-гранулятора.

Предметом дослідження є технологічні, конструктивні та кінематичні параметри гранулятора у взаємозв'язку з енергетичними та якісними показниками, а також фрикційні властивості гранульованих відходів морквяного жому.

Метою дослідження є експериментальне та аналітичне визначення коефіцієнтів тертя спокою та руху гранул із морквяного жому, встановлення закономірностей їх зміни залежно від матеріалу контактної поверхні, нормального навантаження, швидкості взаємного руху та конструктивних параметрів обладнання, а також розробка практичних рекомендацій для оптимізації процесу гранулювання.

Методи досліджень. Експериментальні дослідження проводилися у лабораторних умовах відповідно до прийнятих методик та галузевих стандартів.

Використовували трибометр з електричною сигналізацією початку зсуву та модернізований прилад Крагельського для оцінки тертя руху.

Застосовували моделювання тертя на різних типах поверхонь (металевій, гумовій, дерев'яній) та багаторазові вимірювання (не менше 5 повторів) для підвищення точності.

Обробка результатів здійснювалась із використанням методів математичної статистики.

Основні результати досліджень:

Розроблено та виготовлено трибометр з електричною сигналізацією початку зсуву дослідного зразка, модернізовано конструкцію приладу для дослідження коефіцієнта тертя руху.

Визначено коефіцієнти тертя спокою та руху гранульованого морквяного жому на поверхнях різної шорсткості та матеріалу.

Встановлено, що зі збільшенням нормального навантаження коефіцієнт тертя спокою зменшується, що відповідає закону Кулона та зниженню частки адгезійних сил.

Отримано експериментальні залежності коефіцієнта тертя руху від швидкості ковзання: при зростанні швидкості до 10–12 м/с коефіцієнт зменшується, а подальше збільшення швидкості може викликати коливання через вібрації та нагрівання зразка.

Доведено, що найменше значення коефіцієнта тертя руху спостерігається при контакті зі сталеву поверхнею, а найбільше — при контакті з деревиною.

Побудовано емпіричну модель

$$f(v)=f_0+f_1v+f_2v^2+f_3v^3$$

, яка добре описує фрикційні характеристики гранул (похибка 2–10 %).

Встановлено, що зменшення тертя в зоні пресування може знизити енерговитрати гранулятора на 12–18 % та зменшити інтенсивність зношування матриці.

Надано практичні рекомендації щодо оптимізації режимів пресування: використання сталевих каналів із мінімальною шорсткістю, зниження нормального навантаження на попередніх стадіях ущільнення, контроль вологості біомаси для стабілізації тертя.

Ключові слова: грануляція, відходи сокового виробництва, морквяний жом, коефіцієнт тертя, коефіцієнт спокою, енергоефективність.

ВСТУП

Використання вторинних сировинних ресурсів сокового та овочепереробного виробництва, таких як вичавки чи пюре-відходи, що зберігають харчову цінність, є актуальним і перспективним напрямом розвитку харчової та переробної промисловості. Одним із найбільш ефективних способів утилізації таких побічних продуктів є процес гранулювання, який дозволяє перетворити низькоструктуровані відходи на стабільний, транспортабельний та придатний до подальшої переробки матеріал. Зокрема, морквяний жом має значний потенціал для використання у кормовій, харчовій та біоенергетичній галузях.

Процес гранулювання є складним комплексом фізико-механічних перетворень, що включає ущільнення, витримку під тиском, релаксацію напружень, випресовування та стабілізацію гранул. Ефективність процесу значною мірою визначається якістю виконання кожного етапу, особливо операції стиснення порції сировини до потрібної щільності. На цей процес суттєво впливають фізико-механічні властивості матеріалу – модуль Юнга,

коефіцієнт Пуассона, коефіцієнти в'язкості та тертя, порозність, співвідношення фаз у суміші, точка адсорбції води та критична щільність.

Особливе значення має коефіцієнт тертя, від якого залежать умови та зусилля пресування, енерговитрати, зношування робочих органів, якість формування гранул і стабільність технологічного режиму. Важливим є дослідження взаємодії гранул рослинного походження з поверхнями різної природи – металевими, дерев'яними та гумовими, що характерні для елементів грануляційних систем. Аналіз закономірностей тертя дозволяє оцінити вплив вологості, структури та гранулометричного складу відходів на поведінку матеріалу в зоні пресування.

Таким чином, дослідження процесів тертя гранульованого морквяного жому має не лише теоретичне, але й практичне значення. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення конструкцій прес-грануляторів, підвищення їх ефективності, зниження експлуатаційних витрат та забезпечення довговічності робочих органів. Саме ці завдання стали підґрунтям для проведення даної роботи.

Методи і програма досліджень

Програма досліджень була розроблена з урахуванням необхідності комплексного аналізу фрикційних властивостей гранульованої біомаси. Вона включала такі етапи.

Програма досліджень.

Етап 1. Підготовка зразків

1. Підготовка морквяного жому після виробництва соку.
2. Проведення попереднього висушування до стабільної вологості.
3. Гранулювання сировини за фіксованих технологічних параметрів.
4. Відбір зразків однакового розміру та маси.

Етап 2. Налаштування обладнання

1. Монтаж та калібрування трибометра для визначення тертя спокою.
2. Установлення вимірювальної пружини, датчиків та контактної системи.
3. Монтаж модифікованого приладу Крагельського для дослідження тертя руху.
4. Вибір і встановлення дослідних пластин (сталь, гума, дерево).

Етап 3. Дослідження коефіцієнта тертя спокою

1. Задання нормального навантаження F_N за допомогою вантажів.
2. Плавне підвищення сили тяги через висипання піску.
3. Фіксація моменту початку руху за сигналом електроконтакту.
4. Розрахунок коефіцієнта тертя та повторення вимірювань.

Етап 4. Дослідження коефіцієнта тертя руху

1. Установлення гранули в оправку та розміщення на обертовому диску.
2. Зміна швидкості ковзання в діапазоні 2,5–22,5 м/с.
3. Реєстрація деформації пружного елемента самописцем.
4. Розрахунок сили тертя та коефіцієнтів за формулою:

$$F_T = k \cdot \Delta x.$$

Етап 5. Дослідження впливу матеріалу поверхні

1. Проведення окремих серій експериментів для кожного типу поверхні.
2. Порівняння ефективності ковзання та інтенсивності зношування.

Етап 6. Аналітична обробка результатів

1. Побудова графіків залежностей:
 - $f_s(F_N)$;
 - $f_r(F_N)$;
 - $f_r(v)$.
2. Визначення коефіцієнтів f_0 , f_1 , f_2 , f_3 для емпіричної моделі.
3. Порівняння розрахункових та експериментальних значень.
4. Оцінка впливу шорсткості та природи матеріалу.

Етап 7. Формування висновків та рекомендацій

1. Аналіз трибологічної поведінки гранул.
2. Формування рекомендацій щодо конструкційних рішень для прес-грануляторів.
3. Оцінка можливості зменшення енерговитрат і зносу обладнання.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У ході дослідження було проведено аналітичне моделювання впливу основних технологічних параметрів гранулювання рослинної сировини — тиску, вологості та температури кондиціювання — на фізико-механічні властивості отримуваних гранул. На основі узагальнених експериментальних даних, наведених у літературних джерелах, та з урахуванням закономірностей, описаних у роботі, побудовано залежності, що характеризують зміну щільності, міцності (PDI) та твердості гранул.

Щільність гранул залежить від тиску P згідно зі зростаючим, але нелінійним законом. Математична апроксимація отриманої залежності має вигляд:

$$\rho(P) = \rho_0 + a(P-P_0) - b(P-P_0)^2,$$

де:

$\rho_0 = 800 \text{ кг/м}^3$ – початкова щільність при тиску 20 МПа,
 $a = 1,8$, $b = 0,006$ – емпіричні коефіцієнти.

Крива показує інтенсивне зростання щільності в діапазоні 30–80 МПа, що відповідає стадії активного ущільнення. Понад 90 МПа збільшення щільності зменшується, що узгоджується з переходом матеріалу до «щільної фази» (за Мані, Стелте).

За результатами моделювання залежність PDI від вологості W описується параболою:

$$PDI(W) = c_0 + c_1(W - W_0) - c_2(W - W_0)^2,$$

де:

$$W_0 = 8\%,$$

$$c_0 = 60, c_1 = 3, c_2 = 0,15.$$

Отримана крива підтверджує, що:

помірне зволоження (10–14 %) підвищує PDI,

надмірна вологість (>16 %) знижує міцність гранул через ефект мастила у фільерах.

Підвищення температури сприяє желатинізації крохмалю та пластичній деформації частинок. На основі експериментальних даних літератури отримано лінійну залежність:

$$H(T) = H_0 + k(T - 60),$$

де:

$$H_0 = 20 \text{ Н} \text{ — твердість при } 60 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$k = 0,6 \text{ Н}/^\circ\text{C}.$$

Зростання температури до 90–100 °C забезпечує суттєве підвищення твердості гранул, що відповідає результатам досліджень Абдоллахі, Нетто та Душ Сантуша.

Параметр	Характер впливу	Оптимальний діапазону
Тиск гранулювання	Інтенсивне зростання щільності до 80–90 МПа, після — насичення	60–100 МПа
Вологість сировини	Підвищує PDI до певної межі, надлишок — знижує міцність	10–14 %
Температура кондиціонування	Лінійно підвищує твердість гранул і PDI	80–95 °C

Дані, наведені у статті та підтверджені моделюванням, показують, що тиск є одним із найсильніших факторів, які визначають рівень ущільнення та структуру гранул. Процес гранулювання проходить у дві основні фази:

1) фаза перегрупування частинок — відбувається при низькому тиску (20–40 МПа), коли частинки переміщуються з метою заповнення міжзернових пустот;

2) фаза інтенсивного ущільнення — при тиску 40–90 МПа проявляються зсувні деформації, адгезія і сили Ван-дер-Ваальса.

Залежність щільності гранул від тиску добре описується квадратичною моделлю:

$$\rho(P) = \rho_0 + a(P-P_0) - b(P-P_0)^2,$$

що дозволяє визначити критичну область насичення, у якій навіть суттєве збільшення тиску майже не підвищує щільність:

$$\frac{d\rho}{dP} = 0 \text{ при } P > 90 \text{ МПа.}$$

Проведений аналіз підтверджує відому з літератури закономірність: вміст вологи значною мірою визначає характер контактів між частинками. Вода виконує функцію природного зв'язувального агента, оскільки:

- формує капілярні містки;
- знижує внутрішнє тертя;
- забезпечує пластичність і рівномірне ущільнення маси.

Однак при надлишковій вологості вода переходить у роль мастила, що знижує щільність та довговічність гранул.

Отримана параболічна модель:

$$PDI(W) = c_0 + c_1(W - W_0) - c_2(W - W_0)^2$$

має максимум у точці:

$$W_{opt} = \frac{c_1}{2c_2} + W_0 = 13,5\%.$$

Це математично підтверджує оптимальний інтервал 10–14 %, що цілком узгоджується з результатами Моріца, Абдоллахі та інших дослідників, наведених у статті.

Результати попередніх досліджень, підтверджують:

- чим менші частинки, тим більше площа контакту і адгезія;
- підвищується капілярність → покращується розподіл вологи;
- підвищене тертя дрібних частинок у фільтрі сприяє самонагріванню.

Але надмірне подрібнення (<0,5 мм) створює:

- надмірне тертя, що веде до перегрівання;
- зниження продуктивності гранулятора;
- утворення крихких гранул через «надщільну» структуру.

Тому оптимальний діапазон підтверджується як: 1–3;мм.

Однофакторні дослідження дають важливі висновки, але в реальному процесі параметри взаємопов'язані.

Наприклад:

- підвищення температури зменшує потребу у великому тиску;
- оптимальна вологість залежить від розміру частинок;
- надмірна кількість жирів нівелює ефект довгої фільтри;
- висока швидкість обертання матриці збільшує температуру, змінюючи стан крохмалю.

Це означає, що оптимізація має базуватися на багатфакторних моделях. Одним із варіантів комплексної оцінки є:

$$Q = f(P, W, T, D, L),$$

де

Q – якість гранул,

ВИСНОВКИ

Зміни коефіцієнтів тертя руху пояснюються сукупним впливом комплексу факторів: шорсткості поверхонь, піддатливості та деформації зразка, сил молекулярного зчеплення, а також додаткових чинників – продуктів зносу, вологості тощо. Отримані результати досліджень коефіцієнтів тертя можуть бути використані для розрахунку та проектування прес-грануляторів, транспортуючих машин та іншого технологічного обладнання.

Комплексне дослідження впливу технологічних і конструктивних параметрів на процес гранулювання рослинної сировини підтвердило, що якість гранул та енергоефективність процесу визначаються взаємодією вологості, температури кондиціонування, тиску, розміру частинок, вмісту жирів, швидкості обертання матриці та її геометричних характеристик.

Встановлено, що оптимальні параметри процесу гранулювання – вологість 10–14 %, температура 80–95 °С та тиск 60–90 МПа – забезпечують інтенсивне ущільнення сировини, формування міцних адгезійних зв'язків і отримання гранул із високою щільністю, твердістю та показником PDI. Розмір частинок 1–3 мм сприяє рівномірному проникненню вологи та зниженню енерговитрат, тоді як вміст жирів 2–8 % забезпечує баланс між змазувальною здатністю та міцністю гранул.

Важливу роль відіграють конструктивні параметри матриці: оптимальне співвідношення активної та неактивної зон, форма входу фільтр і їхня довжина визначають тиск у каналі, продуктивність та однорідність гранул.

Таким чином, досягнення високої якості гранул можливе лише за умов комплексної оптимізації всіх технологічних і конструктивних параметрів, що дозволяє одночасно підвищити міцність та однорідність гранул, мінімізувати енергоємність процесу та забезпечити ефективне використання рослинних відходів у виробництві кормів і біопалива.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Червоткіна О. О., Олексієнко В. О. Гранулювання порошкоподібних овочів // Новації в технології та обладнанні готельно-ресторанних, харчових і переробних виробництв: друга міжнародна науково-практична інтернет-

конференція, 23 листопада 2021 р. : [матеріали конференції] / під заг. ред. В.М. Кюрчева. – Мелітополь : ТДАТУ, 2021. С. 73-75.

2. Червоткіна О. О., Тарасенко В. Г. Гранулювання вторинних продуктів переробки рослинної сировини // Новації в технології та обладнанні готельно-ресторанних, харчових і переробних виробництв: друга міжнародна науково-практична інтернет-конференція, 23 листопада 2021 р. : [матеріали конференції] / під заг. ред. В.М. Кюрчева. – Мелітополь : ТДАТУ, 2021. С. 174-175.

3. Червоткіна О. О., Бойко В. С. Виробництво кормів методом екструдювання, поєданого з гранулюванням // Новації в технології та обладнанні готельно-ресторанних, харчових і переробних виробництв: друга міжнародна науково-практична інтернет-конференція, 23 листопада 2021 р. : [матеріали конференції] / під заг. ред. В.М. Кюрчева. – Мелітополь : ТДАТУ, 2021. С. 182-183.

4. Червоткіна О. О., Стручаєв М. І., Тарасенко В. Г. Дослідження процесу гранулювання овочевих відходів за допомогою прес-гранулятора з плоскою матрицею // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету : наукове фахове видання / ТДАТУ: гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев.- Мелітополь: ТДАТУ, 2021. – Вип. 21, т. 1.- с. 160-168.

5. Червоткіна О. О., Олексієнко В. О. Гранулювання порошкоподібних овочів // Новації в технології та обладнанні готельно-ресторанних, харчових і переробних виробництв: друга міжнародна науково-практична інтернет-конференція, 23 листопада 2021 р. : [матеріали конференції] / під заг. ред. В.М. Кюрчева. – Мелітополь : ТДАТУ, 2021. С. 73-75.

6. Червоткіна О. О., Тарасенко В. Г. Гранулювання вторинних продуктів переробки рослинної сировини // Новації в технології та обладнанні готельно-ресторанних, харчових і переробних виробництв: друга міжнародна науково-практична інтернет-конференція, 23 листопада 2021 р. : [матеріали конференції] / під заг. ред. В.М. Кюрчева. – Мелітополь : ТДАТУ, 2021. С. 174-175.

7. Червоткіна О. О., Бойко В. С. Виробництво кормів методом екструдювання, поєданого з гранулюванням // Новації в технології та обладнанні готельно-ресторанних, харчових і переробних виробництв: друга міжнародна науково-практична інтернет-конференція, 23 листопада 2021 р. : [матеріали конференції] / під заг. ред. В.М. Кюрчева. – Мелітополь : ТДАТУ, 2021. С. 182-183.

8. Червоткіна О. О., Стручаєв М. І., Тарасенко В. Г. Дослідження процесу гранулювання овочевих відходів за допомогою прес-гранулятора з плоскою матрицею // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету : наукове фахове видання / ТДАТУ: гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев.- Мелітополь: ТДАТУ, 2021. – Вип. 21, т. 1.- с. 160-168.

9. Бойко В. С., Самойчук К. О., Тарасенко В. Г., Верхоланцева В. О., Паляничка Н. О., Михайлов Є. В., Червоткіна О. О. Процеси і апарати. Механічні та гідромеханічні процеси. Київ: ПрофКнига, 2021. 468 с.

10. Червоткіна О. О., Фучаджи Н. О., Паляничка Н. О., Самохвал В. А. Вплив різних параметрів на процес гранулювання рослинної сировини та якість гранул. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. Запоріжжя: ТДАТУ, 2023. Вип. 23, т. 2.

11. Червоткіна О. О., Фучаджи Н. О., Ковальов О. О., Паляничка Н. О., Матвіїшин П. В. Аналіз методів отримання гранул і засобів для їх реалізації. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету : електронне наукове фахове видання. Запоріжжя : ТДАТУ. 2023. Вип. 13, том 2. С. 143-150

12. Самохвал В.А., Самойчук К.О., Червоткіна О.О. Дослідження роботи остаточного формування брикету з здатністю відбору олій при виготовленні паливних брикетів на гвинтових прес-екструдерах. Збірник тез доповідей V Міжнародної науково-практичної конференції Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі (01-24 листопада 2023 р.). Запоріжжя, 2023р. С. 159-162.

13. Бойко В. С., Самойчук К. О., Тарасенко В. Г., Верхованцева В. О., Паляничка Н. О., Михайлов Є. В., Червоткіна О. О. Процеси і апарати. Механічні та гідромеханічні процеси. Київ: ПрофКнига, 2021. 468 с.

14. Червоткіна О.О., Прокопенко О.П., Грінько Є.О. Дослідження та розробка інноваційних способів утилізації відходів, що утворюються при переробці фруктів і овочів. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі»(01-25 листопада 2024 р.)

РОЗДІЛ 5

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ СТРУМИННОГО ЗМІШУВАННЯ НАПОЇВ

РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження є процес струминного змішування рідких харчових продуктів.

Предметом дослідження є закономірності впливу технологічних, конструктивних та гідравлічних параметрів роботи струминного змішувача на його якісні та енергетичні показники.

Метою дослідження є зниження енергетичних витрат процесу при забезпеченні високої якості перемішування води та купажного сиропу на основі цукру шляхом обґрунтування конструктивно-технологічних та гідравлічних параметрів струминного змішувача

Методи досліджень. Поставлені задачі вирішувалися з використанням теоретичних методів дослідження, при проведенні яких були використанні сучасні моделі процесу змішування, руху потоку по змішувачу з урахуванням елементів вищої математики, фізики дискретних середовищ, теоретичної механіки, та математичної статистики. Процес руху потоку рідини в змішувачі вивчали за допомогою програмного комплексу ANSYS з попереднім створенням геометричної моделі камери в програмі Solid Works.

Основні результати досліджень:

1. Створені комп'ютерні моделі процесу протитечійно-струминного змішування рідин у змішувачах.
2. Аналітично визначено залежності продуктивності протитечійно-струминного змішувача рідких компонентів від відстані між соплами форсунок.
3. Експериментально визначено вплив відстані між соплами форсунок на продуктивність протитечійно-струминного змішувача.
4. Експериментально визначено вплив відстані між соплами форсунок на якість змішування у протитечійно-струминному змішувачі.

**ЗМІШУВАННЯ, ПРОТИТЕЧІЙНО-СТРУМИННИЙ ЗМІШУВАЧ,
ПАРАМЕТРИ, ВІДСТАНЬ МІЖ ФОРСУНКАМИ.**

ВСТУП

Технологічне призначення перемішування рідин різноманітне. Цей процес застосовують у харчовій промисловості для інтенсифікації хімічних, теплових і масообмінних процесів, а також для приготування емульсій, суспензій та розчинів. При виготовленні безалкогольних напоїв одним з

основних процесів є перемішування купажного сиропу або концентрату з підготовленою водою, тобто перемішування рідких компонентів.

Сьогодні безалкогольні напої користуються дуже великим попитом, тому розробка і впровадження у виробництво змішувачів, які забезпечать якісне перемішування рідин при мінімальних витратах енергії і часу є актуальним. Змішувачі повинні бути економічними, надійними, простими у виготовленні та обслуговуванні, мати прості схеми включення в різні установки.

Відомі різні способи перемішування рідин. В залежності від методу підведення енергії до перемішуваних середовищ, перемішування може бути пневматичним, інерційним, в потоці рідини, циркуляційним, механічним або струминним.

В результаті аналізу різних способів перемішування рідких компонентів струминне перемішування було виділено як найбільш доцільний спосіб, адже для досягнення одного й того ж технологічного ефекту при використанні інших способів витрачається більше часу і енергії. Ступінь і ефективність перемішування в струминних апаратах дуже високі внаслідок підведення значних потужностей до невеликого об'єму. Висока надійність струминних апаратів зумовлена відсутністю в них рухомих механізмів. Перемішування здійснюється за рахунок кінетичної енергії потоків рідин. Процес перемішування відбувається у відповідній камері, завдяки турбулентності потоків підведених рідин.

Дослідження струминного змішування рідин є складним процесом, зокрема проблематичним є аналітичне визначення впливу відстані між соплами форсунок на витрату рідини, а значить на продуктивність змішувача. Також визначення впливу відстані між соплами форсунок є важливим для знаходження швидкості струменів у момент зіткнення, адже саме швидкість струменів визначає якість змішування.

ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження проводили в лабораторних умовах за традиційними та розробленими методиками. Процес руху потоків рідини у змішувачі вивчали за допомогою програмного комплексу ANSYS. Оптимальні технічні та конструктивні параметри струминного змішувача визначали методом математичного планування багатофакторного експерименту. Теоретичні розрахунки і статистичну обробку експериментальних даних проводили із застосуванням пакетів прикладних програм на ПЕОМ.

Теоретичні дослідження проводились з використанням сучасних моделей процесу змішування, руху потоку по змішувачу з урахуванням елементів вищої математики, фізики дискретних середовищ, теоретичної механіки, та математичної статистики. Аналітичні дослідження базувались на теорії процесів переносу у зустрічних струменях. Теоретичні залежності базувалися на класичних залежностях гідродинаміки.

Програмою досліджень передбачено:

1 – Комп'ютерне моделювання процесу змішування компонентів у струминному змішувачі з протитечійним способом підведення інжектваного компоненту.

2 – Комп'ютерне моделювання процесу змішування компонентів у протитечійно-струминному змішувачі.

3 – Аналітичне визначення залежності продуктивності протитечійно-струминного змішувача рідких компонентів від відстані між соплами форсунок.

4 – Аналітичне визначення залежності якості змішування в протитечійно-струминному змішувачі рідких компонентів від відстані між соплами форсунок.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Струминні змішувачі відрізняються формою камер змішування, кількістю каналів підводу інжектваних компонентів та способом підведення інжектваного компоненту; існують змішувачі з супутним та протитечійним способом підведення (рис.1).



Рис.1. Класифікація змішувачів рідких компонентів.

В свою чергу статичні змішувачі поділяються на (рис. 2):



Рис.2. Класифікація змішувачів

В ході вивчення процесів змішування рідин було визначено що використовуючи протитечійний спосіб підведення виникає додаткове змішування оскільки основний потік з великою швидкістю зустрічається з потоком інжектваного компоненту.

В ході подальших досліджень необхідно розробити структурну схему досліджень, загальний вигляд якої наведено на рисунку 3.



Рис. 3. Структурна схема проведення досліджень

Отже, теоретичні дослідження потрібно починати зі створення моделі перемішування рідких компонентів у протитечійно-струминному змішувачі. Вона включає дослідження сил, які діють в струменях перемішуваних компонентів, а також таких чинників, як тиск, швидкість, кінетична енергія

турбулентності, дисипація кінетичної енергії турбулентності. Моделювання процесу перемішування рідких компонентів проводилось в програмному комплексі кінцево-елементного аналізу ANSYS який має високу точність програми; можливість оперування великою кількістю параметрів процесу, забезпечення при використанні програми значень густини, в'язкості компонентів найбільш наближеними до їх реальних значень. Для визначення ефективності роботи струминного змішувача було розроблено його схему та принцип дії. Проведено моделювання процесу змішування робочого потоку з інжектуючою рідиною. Для цього в програмному комплексі Solid Works було створено геометрично параметризовану модель камери, струменя підмішуваного компоненту (купажного сиропу) та потоку основного компоненту (води), які в подальшому було інтегровано до програмного комплексу ANSYS; обґрунтовано межі варіювання значень досліджуваних параметрів - відстань між соплами форсунок, тиск подачі компонентів та діаметр каналу подачі сиропу.

Струминний змішувач з протитечійним підведенням інжектуючого компоненту

Здійснено дослідження якості процесу змішування робочого і інжектуючого потоків. Для дослідження було обрано протитечійний спосіб підведення інжектуючої рідини.

Принцип дії змішувача полягає у тому, що основний потік проходить через камеру змішування і зустрічається з потоком інжектуючого компоненту, який подається насосом, при цьому відбувається змішування компонентів.

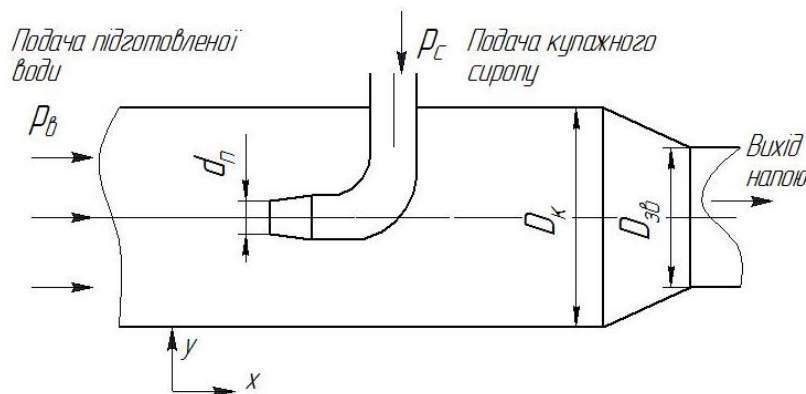


Рисунок. 4 – Схема струминного змішувача з протитечійним способом підведення інжектуючого компоненту.

Проведено моделювання процесу змішування підготовленої води (основний компонент) з купажним сиропом при виробництві напою «Лимонад».

Згідно технологічній інструкції на виробництво безалкогольних напоїв і рецептурі напою «Лимонад» вихідними даними при моделюванні були:

температура підготовленої води (4°C), її густина (1г/см^3); температура купаного сиропу (10°C), масова частка сухих речовин в купаному сиропі $53,5\%$, масова частка сухих речовин в готовому напої $12,5\%$. Змішування купажного сиропу з підготовленою водою проводять у співвідношенні $1:5$.

Тиск підготовленої води на вході в камеру змішування $p_e=0,2$ МПа. Діаметр камери змішування $D_k=40$ мм. Тиск подачі купаного сиропу змінювали у межах $p_c=0,2-0,3$ Мпа. Діаметр патрубку підведення компоненту d_n приймали рівним $4, 6, 8$ мм.

Змінюючи тиск купажного сиропу в камеру змішування було досліджено процес перемішування його з підготовленою водою з метою визначення оптимального режиму роботи змішувача.

Завдяки моделюванню процесу змішування в програмному комплексі ANSYS було створено поле швидкостей (рисунок 2), тиску в камері змішування, залежності кінетичної енергії турбулентності, дисипації турбулентності (рисунок 5), вектори руху елементарних потоків і лінії токів в камері змішування.

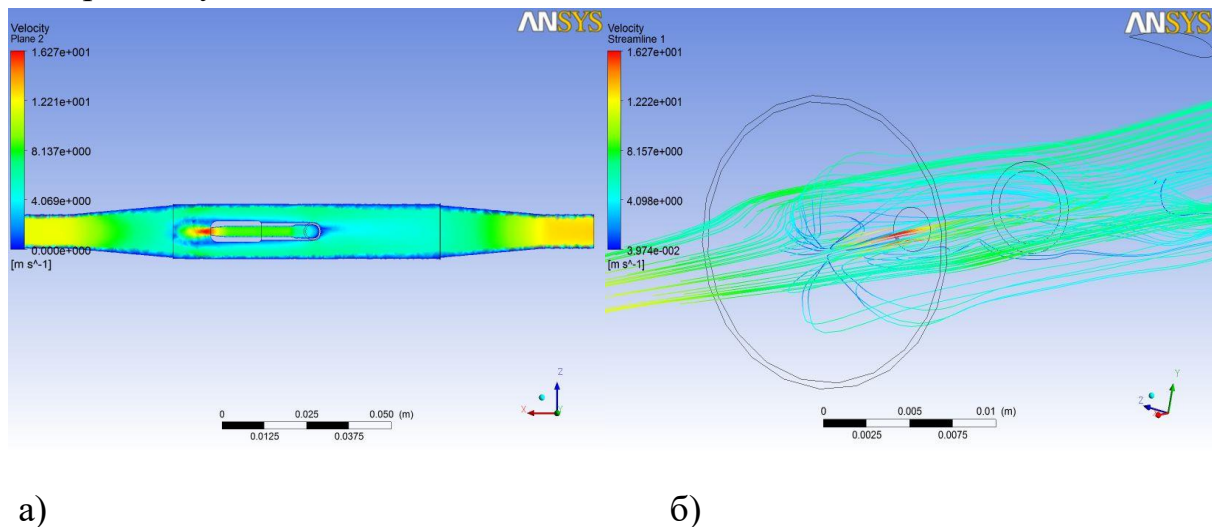


Рисунок 5 – Результати моделювання в ANSYS: а) поле швидкостей камери змішування в вертикальній площині, б) подача купаного сиропу.

Відповідно до рисунку 2 швидкість руху рідин у різних зонах робочого об'єму камери змішування не однакова. При тиску купажного сиропу $p_c=0,3$ МПа вона коливається від 2 до 13м/с , при $p_c=0,2$ МПа – $0,5-9$ м/с. Найбільших значень ($9-13$ м/с) швидкість досягає в зоні підводу основного потоку, за ввідним патрубком і на звуженні каналу в кінці камери змішування. При зміні d_n від 4 до 8 мм швидкість потоку збільшується, що призводить до збільшення довжини зони змішування і підвищення якості змішування.

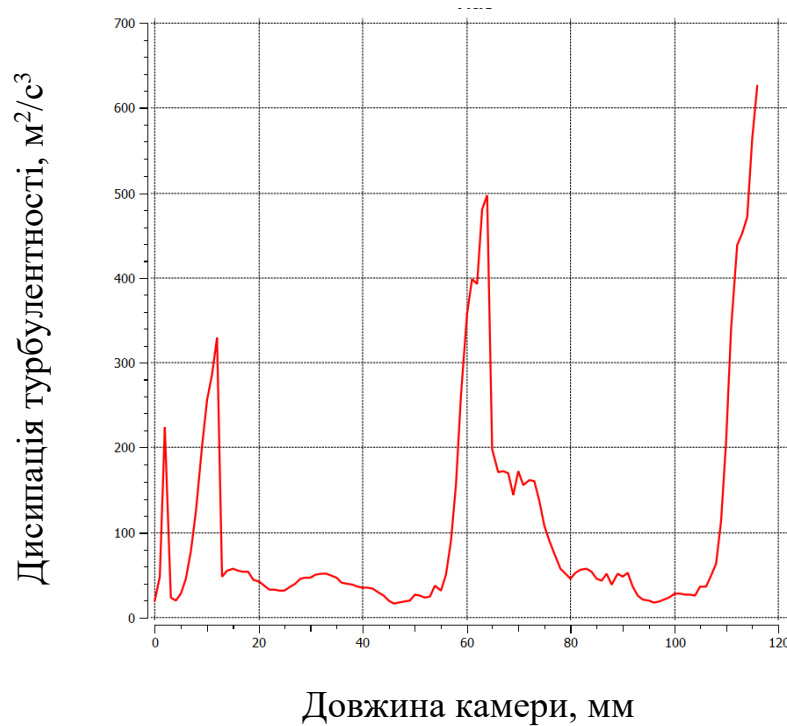


Рисунок 6 – Графік дисипації турбулентності в камері змішування.

Графік дисипації турбулентності в камері змішування має три чітких піки. Ці максимуми (як і найбільші значення швидкостей) припадають на зону підводу (зростання з $20 \text{ м}^2/\text{с}^3$ до $330 \text{ м}^2/\text{с}^3$), за ввідним патрубком ($318 \text{ м}^2/\text{с}^3$ до $500 \text{ м}^2/\text{с}^3$) і на звуження каналу в кінці камери змішування (з $30 \text{ м}^2/\text{с}^3$ до $640 \text{ м}^2/\text{с}^3$). При збільшенні d_n різниця між піками зменшувалась, що призводить до зменшення якості перемішування.

Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що перемішування купажного сиропу з водою відбувається у декількох зонах змішувальної камери, а саме в зоні підводу сиропу, за ввідним патрубком (в цій зоні спостерігається розрідження від $0,2 \text{ МПа}$ до $0,1 \text{ МПа}$), а також на звуженні каналу в кінці камери змішування. Всі ефекти перемішування супроводжуються підвищенням тиску в середньому на 50% і зниженням швидкості потоку на $80\text{--}85\%$. Це пояснюється там що на цих ділянках зростає кінетична енергія турбулентності і її дисипація. Збільшення тиску та зменшення діаметру патрубку подачі купажного сиропу призводить до підвищення якості змішування.

Протитечійно-струминний змішувач.

Схему розробленої конструкції протитечійно-струминного змішувача представлено на рис. 7. Змішувач складається з двох форсунок 2, встановлених співвісно, корпусів камер вводу підмішуваного компоненту 3 і ежекторів 4. Змішування відбувається в центральній частині камери змішування 1. В результаті проникнення часток одного струменя у зустрічний досягається висока рівномірність розподілу компонентів.

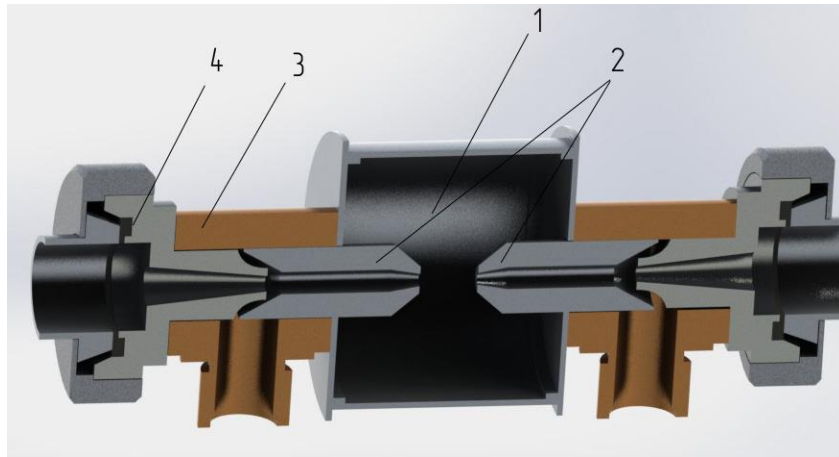


Рисунок 7. Протитечійно-струминний змішувач. 1 – камера змішування; 2 – форсунка; 3 – корпус камери вводу підмішуваного компоненту; 4 – ежектор.

Основними критеріями, які визначають процес перемішування, є число Рейнольдса, турбулентність, кінетична енергія турбулентності та величина її дисипації за площею зіткнення струменів.

Процес перемішування підготовленої води з купажним сиропом при протитечійно-струменевому змішуванні відбувається у два етапи. На першому з них перемішування води з сиропом відбувається в змішуючому каналі (соплі) форсунки. Фактично, процес перемішування води з сиропом на цьому етапі можна представити як окремий випадок перемішування у струминному апараті (потік підготовленої води передає кінетичну енергію потоку купажного сиропу шляхом безпосереднього контакту (змішування); потоки робочого і інжектваного компонентів надходять до камери змішування де відбувається вирівнювання швидкостей), але основний процес змішування буде відбуватися при зіткненні струменів.

Задача про зіткнення струменів належить до числа класичних. Найбільш повно вона викладена у роботах, де наведені аналітичні рішення задач про зіткнення будь-якої кількості струменів як вільних, так і тих, що витікають з каналів з прямокутними стінками. Для випадку зіткнення двох струменів під довільними кутами задача є невизначеною, але має рішення у випадку протилежних напрямків струменів. Отримані рівняння для визначення швидкості кожної точки такого потоку, виходячи з ширини струменів і зсуву одного струменя відносно іншого (який звичайно не повинен перевищувати суми ширини струменів, інакше струмені не зіткнуться).

Схематично представимо це (рис. 8), з рядом припущень:
– вісі струменів рідини перетинаються;

- конструкція, форма та розміри форсунок, надлишковий тиск рідини, що подається через них, ідентичні, що у свою чергу формує симетричні відносно вісі форсунок струмені рідини з ідентичними параметрами;
- не враховуємо відбиття струменів рідини від стінок камери, де розташовані форсунки;

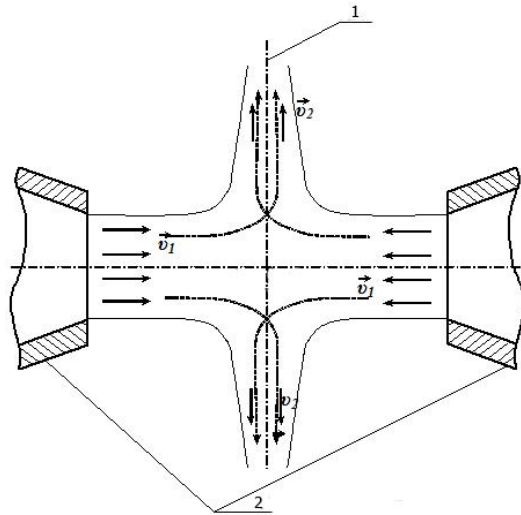


Рисунок 8. Схема зіткнення струменів рідини. 1 – лінія розділу потоків; 2 – сопла форсунок; v_1 – швидкість руху рідини при виході з сопла форсунки; v_2 – швидкість руху потоку рідини після зіткнення струменів.

– вважаємо, що швидкість ядра струменя дорівнює швидкості потоку рідини на периферії. Ця умова практично виконується при малих відстанях від сопла, адже сопла форсунок планується розташувати якомога ближче одне до одного, щоб збільшити швидкість зіткнення струменів;

– при зростанні концентрації купажного сиропу в напої від пропорції 1:3 до 1:6 щільність рідини збільшується на 2% тому при подальших розрахунках зміна щільності напою не враховується

Рідина при виході з сопла форсунки рухається зі швидкістю v_1 . Після зіткнення, потік рідини змінює напрямок руху на 90° і рухається зі швидкістю v_2 , яка зменшується при збільшенні відстані від вісі форсунок.

Із збільшенням швидкості струменя зростає число Рейнольдса, а значить зростає турбулентність потоку. Таким чином, для збільшення ступеня перемішування купажного сиропу з підготовленою водою необхідно збільшувати швидкість струменів рідини у момент зіткнення. Зрозуміло, що при збільшенні відстані між соплом та лінією розділу струменів, швидкість потоку зменшується, завдяки чому буде зменшуватися і ступінь перемішування.

Відома залежність для визначення об'єму рідини, що витікає з форсунки за одиницю часу. Для протитечійно-струминного змішувача, що складається з двох форсунок, можна записати

$$Q = \mu \frac{\pi d^2}{2} \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \Delta p}, \quad (1)$$

де μ – коефіцієнт витрат (залежить від конструкції форсунки);

d_c – діаметр сопел форсунок, м;

ρ – щільність рідини, кг/м³;

Δp – перепад між тиском рідини у середині форсунки і тиском навколишнього середовища, в яке витікає рідина.

Крім того, при зближенні форсунок на деяку величину a_{min} , площа живого перерізу струменів, що відводяться, стане менше площі отворів сопел форсунок, внаслідок чого, при незмінному значенні надлишкового тиску, зменшиться продуктивність змішувача (4).

Розрахуємо мінімальну відстань між соплами форсунок a_{min} із умови забезпечення найвищої продуктивності змішувача.

Для отримання найбільшої продуктивності протитечійно-струминного змішувача необхідно, щоб площа циліндричної поверхні, утворена соплами форсунок, S_2 , м², (на рис. 9 відмічена штриховою лінією) була більше за площу отворів форсунок, тобто $S_2 > 2 \frac{\pi d_c^2}{4}$.

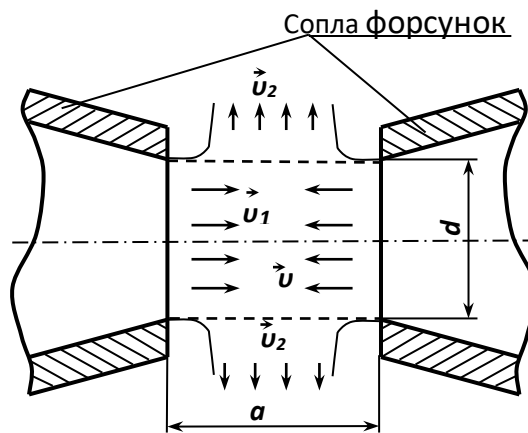


Рисунок 9. Схема визначення мінімальної відстані між соплами форсунок з умови отримання найбільшої продуктивності протитечійно-струминного змішувача.

Враховуючи, що $S_2 = \pi d_c a$, після перетворень отримаємо $a > \frac{d_c}{2}$, тобто $a_{min} = 0,5 d_c$. Звідки при $a \geq d_c / 2$ продуктивність протитечійно-струминного змішувача визначається за формулою (1), а при $a < d_c / 2$ – за формулою $Q = \mu \pi d_c a \sqrt{2 \rho_m \cdot \Delta p}$.

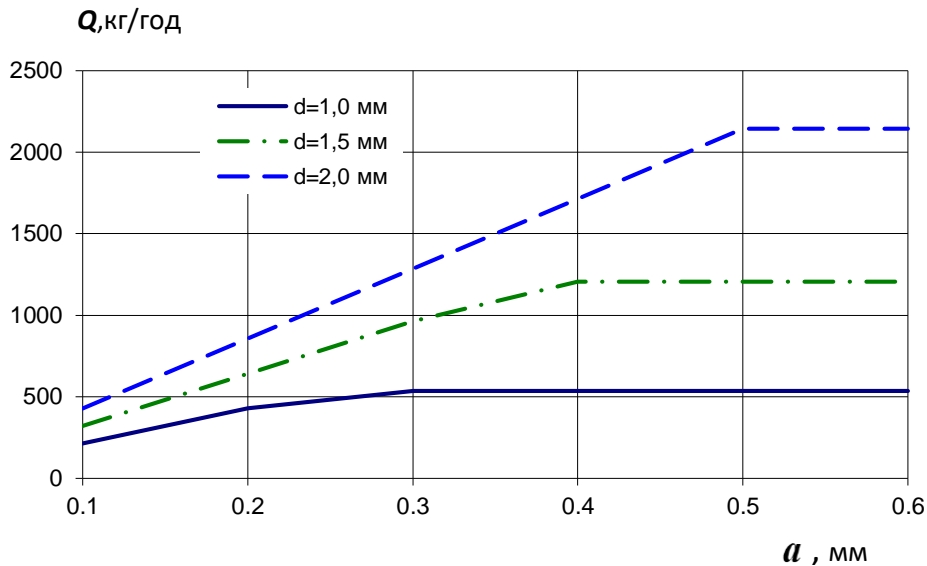


Рисунок 10. Залежність продуктивності від відстані між соплами форсунок

Одночасно зі зменшенням продуктивності змішувача при зближенні форсунок до відстані, що менше за половину діаметра сопла, змінюється швидкість струменя у момент зіткнення. При $a > d_c / 2$ швидкість струменя перед зіткненням v_1 (приймали рівною швидкості струменя при виході з форсунки) (рис. 11 а). При $a < d_c / 2$ швидкість потоку молока до зіткнення v_3 буде менше за v_1 при незмінному значенні надлишкового тиску (рис. 11 б) $v_3 < v_1$.

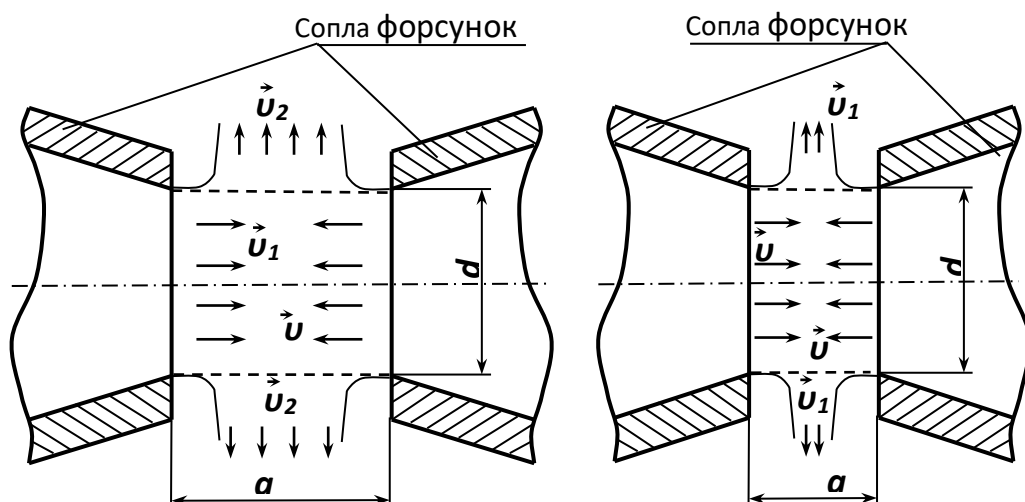
Остання нерівність витікає з умови нерозривності потоку:

$$\pi d_c a v_1 = 2 \frac{\pi d_c^2}{4} v_3, \text{ тобто } \frac{v_1}{v_3} = \frac{d_c}{2a}. \text{ І при умові } a < d_c / 2 \text{ отримаємо нерівність}$$

$v_3 < v_1$. Остання нерівність витікає з умови нерозривності потоку

$$\pi d_c a v_1 = 2 \frac{\pi d_c^2}{4} v_3, \text{ тобто } \frac{v_1}{v_3} = \frac{d_c}{2a}. \text{ Швидкість струменя перед зіткненням}$$

при $a < d_c / 2$ можна розрахувати як $v_3 = v_1 \frac{2a}{d_c}$.



а)

б)

Рисунок 11. Схема зіткнення струменів а) при $a > d/2$ і б) при $a < d/2$.

Завдяки моделюванню процесу змішування в програмному комплексі ANSYS було створено поле швидкостей в камері змішування, при постійному значенні тиску подачі 0,2 МПа, щільності рідини 1035кг/м³ (рис. 12).

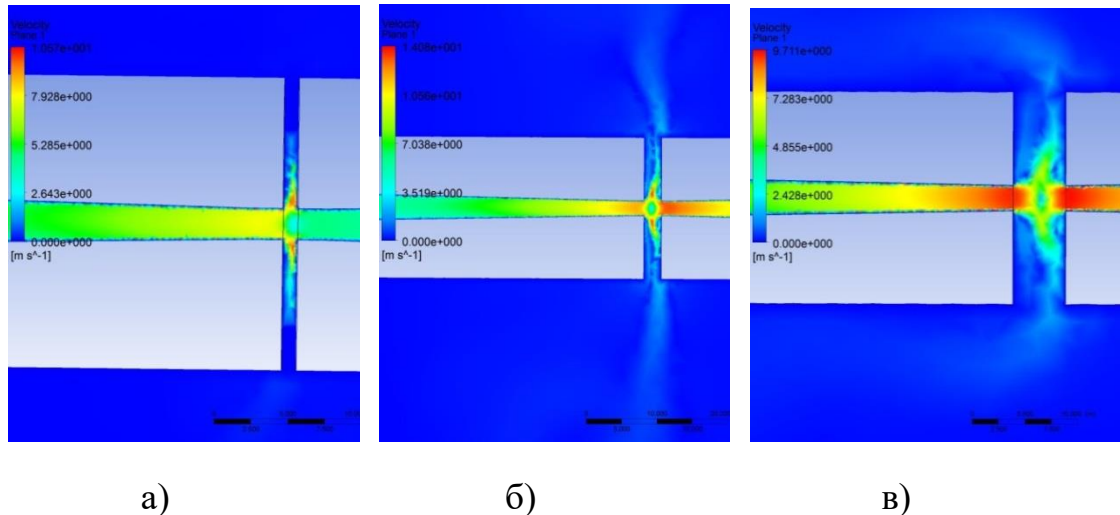


Рисунок 12. Поле швидкостей. а) при відстані між форсунками $a=0,5d_c$; б) при відстані між форсунками $a=d_c$; в) при відстані між форсунками $a=2d_c$.

При відстані між форсунками $a=0,5d_c$ найбільшу швидкість потік рідини має після зіткнення струменів, який у 1,3...1,5 разів більше за швидкість при виході рідини з форсунки. Максимальна швидкість у даному випадку сягає значення 10 м/с. При відстані між форсунками $a=d_c$ максимальна швидкість однакова в зоні виходу рідини з форсунки і в зоні між торцевими поверхнями форсунок і сягає значення 14 м/с. При відстані між форсунками $a=2d_c$ максимальну швидкість потік рідини має в зоні виходу з форсунки. Швидкість потоку в зоні між торцевими поверхнями форсунок є у 1,7...1,9 разів меншою за швидкість при виході рідини із форсунки і сягає значення 9,5мс⁻¹.

З умови отримання високого ступеня змішування рідини швидкість у момент зіткнення повинна бути максимальною. Тому максимальна якість змішування досягається при $a=d_c$.

Побудовано поле кінетичної енергії турбулентності для різних значень відстані між соплами форсунок. (рис 13)

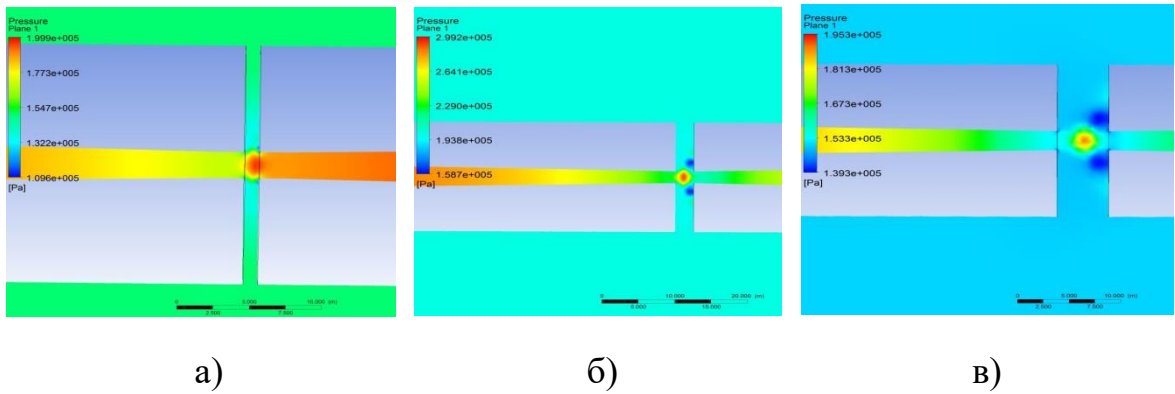


Рисунок 15. Поле давлень а) при расстояннн между форсунками $a=0,5d_c$; б) при расстояннн между форсунками $a=d_c$; в) при расстояннн между форсунками $a=2d_c$.

Зона максимального тиску очікувано знаходиться в центрі між форсунками, причому максимальне значення $3 \cdot 10^5$ Па досягається при $a=d_c$. Ця величина в 1,5 рази перевищує тиск на вході в форсунки. При збільшенні відстані a більше ніж діаметр сопла відбувається зменшення розміру зони високого тиску між форсунками, що свідчить про зменшення турбулентності потоку в зоні зустрічі струменів.

При відстані між форсунками $a=0,5d_c$ найбільшу швидкість потік рідини має після зіткнення струменів (рис.16), яка в 1,3...1,5 рази більше швидкості при виході рідини з форсунки. Максимальна швидкість в даному випадку сягає значення 10 м/с. При відстані між форсунками $a=d_c$ максимальна швидкість однакова в зоні виходу рідини з форсунки та в зоні між торцевими поверхнями форсунок і сягає значення 14 м/с.

При відстані між форсунками $a=2d_c$ максимальну швидкість потік рідини має в зоні виходу з форсунки. Швидкість потоку в зоні між торцевими поверхнями форсунок а 1,7...1,9 рази менше швидкості при виході рідини з форсунки та сягає значення 9,5м/с.

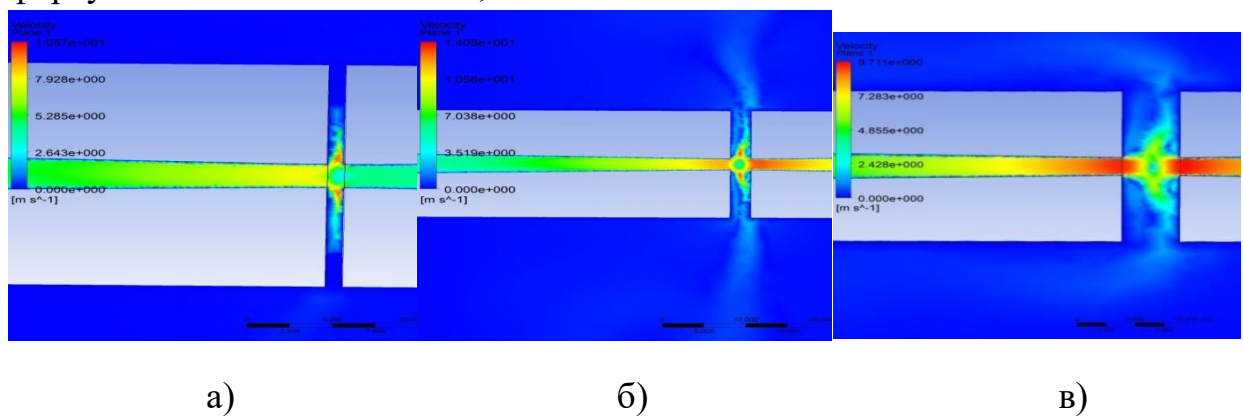


Рисунок 16. Поле швидкостей: а) при відстані між форсунками $a=0,5d_c$; б) при відстані між форсунками $a=d_c$; в) при відстані між форсунками $a=2d_c$.

Таким чином, із збільшенням відстані між форсунками, внаслідок збільшення швидкостей струменів в момент зіткнення, виникає кінетична енергія турбулентності, але її дисипація сягає максимального значення при відстані між форсунками $a=d_c$. Дисипація потужності застосовно до струминного змішування характеризує інтенсивність взаємодії потоків рідини, що призводить до розповсюдження молекул однієї речовини між молекулами іншої. З умови отримання високого ступеня змішування рідких компонентів, окрім високої турбулентності потоків, необхідна рівномірність розподілу кінетичної енергії, повне охоплення змішувачого потоку рідини зустрічним потоком, виключення вторинних завихрень, які тільки частково охоплюють потік. Виходячи з цих умов максимальна якість змішування досягається при $a=d_c$, що підтверджує припущення, висунуте на підставі аналізу математичних залежностей, про те, що виходячи з умов отримання найвищого ступеня змішування та максимальної продуктивності оптимальна відстань соплами форсунок повинна дорівнювати діаметру сопла форсунки.

Перед проведенням експериментальних досліджень визначаються сталі та обираються змінні фактори процесу (рис. 17)

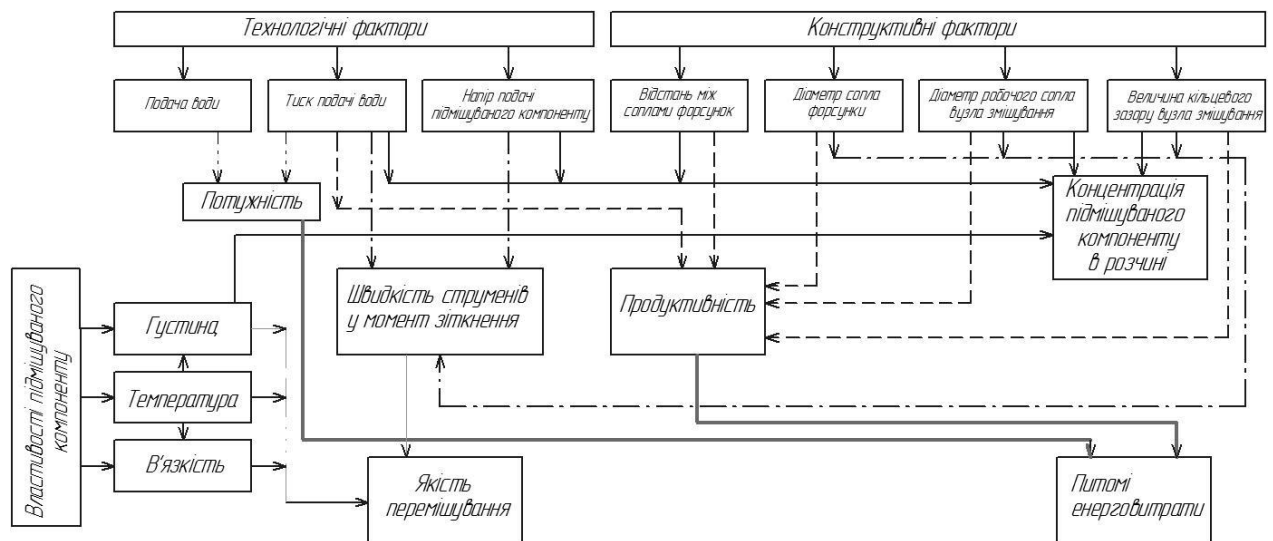


Рисунок 17. Блок-схема взаємозв'язку основних факторів, вихідних параметрів та критеріїв оптимізації в протитечійно-струминному змішувачі рідких компонентів.

Розроблено загальну схему лабораторної установки для дослідження процесу змішування (рис.18)

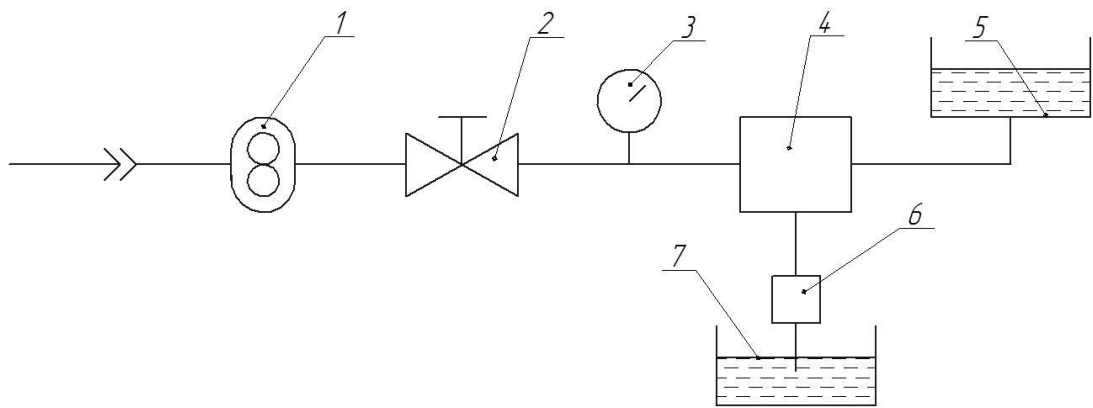


Рис. 18. Загальна схема лабораторної установки для дослідження процесу змішування. 1 – насос; 2 – обертовий кран; 3 – манометр; 4 – протитечієно-струминний змішувач; 5 – ємність з підмішуваним компонентом (концентратом); 6 – кондуктометр; 7 – приймальна ємність для змішаного продукту.

Необхідний тиск подачі основного компонента (води) створюється насосом 1. Регулювання тиску подачі води здійснюється обертовим краном 2. Контроль тиску здійснюється за допомогою манометру 3. Вода надходить у протитечієно-струминний змішувач 4. Підмішуваний компонент потрапляє до змішувача з ємності 5. Після змішування у протитечієно-струминному змішувачі змішаний продукт відводиться до приймальної ємності 7. Контроль якості перемішування води з концентратом здійснюється за допомогою кондуктометру 6.

Для проведення експериментальних досліджень була виготовлена експериментальна установка

Експериментальні дослідження проводилися за такою методикою: у якості основи виступає водопровідна вода ГОСТ 2874-82 температурою 20°C (290°K) і щільністю 1000 кг/м^3 . Вода подається в ежектор під тиском $0,2\text{ МПа}$. При проходженні крізь ежектор кінетична енергія потоку води підвищується, а потенційна знижується до створення розрідження, що досягає максимального значення у місці найбільшого звуження потоку, тобто на виході з ежектора. В камеру вводу підмішуваного компонента підводився концентрат на основі підсолоджувачів (аспартаму та сахарину) «Лимонад» температурою 20°C (290°K) і щільністю 1050 кг/м^3 під атмосферним тиском. При проходженні струменя води крізь камеру вводу підмішуваного компонента у потік води ежектуються концентрат. При проходженні струменя крізь форсунку відбувається попереднє змішування води з концентратом, а при зіткненні струменів відбувається остаточне змішування рідких компонентів.

На описаній лабораторній установці досліджувався вплив технологічних і кінематичних параметрів на процес змішування.

З умови отримання високого ступеня змішування рідини швидкість у момент зіткнення повинна бути максимальною. На підставі аналізу математичних залежностей і результатів моделювання процесу струминного змішування у програмному комплексі ANSYS [4] було визначено, що максимальна якість змішування досягається при $a=d_c$.

З огляду на результати аналітичних досліджень для проведення пошукового експерименту були визначені такі межі варіювання факторів:

- відстань між соплами форсунок (нижня межа 8 мм, верхня – 24 мм, крок зміни фактору – 2 мм),
- тиск подачі води (нижня межа 1,2 атм, верхня – 2,2 атм, крок зміни фактору – 0,5 атм),
- рівень концентрату відносно осі форсунок (нижня межа 100мм, верхня – 400 мм, крок зміни фактора – 100 мм).

Експериментальні дослідження проводилися за такою методикою: основа, якою виступає водопровідна вода ГОСТ 2874-82 температурою 20° С (290° К) і щільністю 1000 кг/м³, подається в ежектор під тиском. При проходженні крізь ежектор кінетична енергія потоку води підвищується, а потенційна знижується до створення розрідження, що досягає максимального значення у місці найбільшого звуження потоку, тобто на виході з ежектора. У камеру уводу підмішуваного компонента підводився концентрат «Лимонад» на основі підсолоджувачів аспартаму та сахарину температурою 20° С (290° К) і щільністю 1050 кг/м³ під атмосферним тиском. При проходженні струменя води крізь камеру уводу підмішуваного компонента, у потік води ежектується концентрат. При проходженні струменя крізь форсунку відбувається попереднє змішування основного компонента з підмішуваним, а при зіткненні струменів відбувається остаточне змішування рідких компонентів. Розмір камери уводу підмішуваного компонента в обох форсунках встановлено постійним. Визначення вмісту концентрату в змішаному розчині визначалось методом титрування. Якість змішування визначалась за допомогою кондуктометру. Checker (виробник Hanna Instruments).

Відстань між соплами форсунок змінювали осьовим переміщенням форсунок у напрямних втулках.

Тиск подачі води змінювали за допомогою вихрового насосу (виробник KENLE, $H_{\max}=50\text{м}$, $Q_{\max}=50\text{л/хв}$), контроль тиску подачі води в змішувач здійснювали за допомогою манометру (ГОСТ 2405 – 88 межі вимірювання – до 6 атм).

Змінювали напір концентрату при подачі його в камеру підводу підмішуваного компоненту зміною висоти ємності з концентратом відносно осі форсунок змішувача.

При відстані між соплами форсунок 24 мм, тиску подачі води 0,12...0,22 МПа, напорі концентрату 0,1...0,3 м, величині кільцевого зазору в камері ежекції 0,9 мм отримали кислотність розчину 3,08–3,46 см³ що є позитивним результатом, так як за технологічною інструкцією виготовлення безалкогольного напою «Лимонад» кислотність напою повинна становити 3,5±0,5см³.

Для оцінки якості перемішування було визначено середньоквадратичне відхилення σ значень електропровідності отриманого розчину при різних технологічних параметрах процесу змішування.

Результати дослідження якості перемішування рідин при даних умовах наведені на рис. 19. Отримані такі залежності електропровідності розчину від часу:

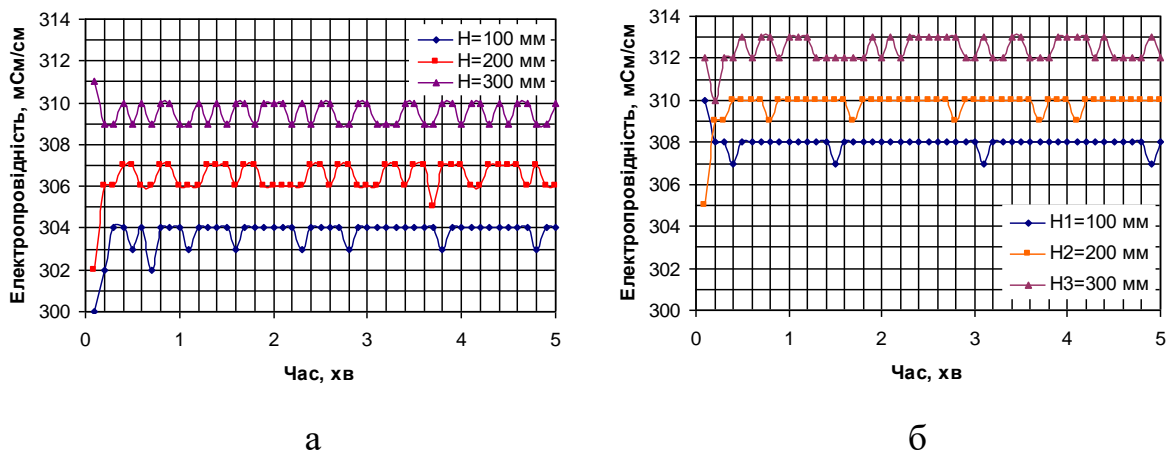


Рис.19. Залежність електропровідності розчину від часу: а – при тиску подачі води 0,17 МПа; б – при тиску подачі води 0,22 МПа.

При тиску подачі води 1,7 атм отримали такі результати середньоквадратичного відхилення значень миттєвої концентрації продукту (рис.4а): при напорі подачі концентрату 100мм $\sigma_1=0,34$; при напорі подачі концентрату 200 мм $\sigma_2=0,47$; при напорі подачі концентрату 300 мм, $\sigma_3=0,49$.

При тиску подачі води 2,2 атм отримали такі результати середньоквадратичного відхилення значень миттєвої концентрації продукту (рис. 4б): при напорі подачі концентрату 100мм $\sigma_1=0,25$; при напорі подачі концентрату 200мм $\sigma_2=0,32$; при напорі подачі концентрату 300мм, $\sigma_3=0,46$.

Найвищу однорідність концентрації підмішуваного компоненту можна отримати при тиску подачі води 2,2 атм і напорі подачі концентрату 100мм ($\sigma=0,25$), а найнижчу при тиску подачі води 1,7 атм і напорі подачі концентрату 300 мм, ($\sigma=0,49$). Аналіз результатів підтверджує аналітично

отриманий висновок, про підвищення однорідності змішування при підвищенні швидкості зіткнення струменів, що відбувається при збільшенні подачі через вихідні сопла апарату та при підвищенні тиску води на вході в змішувач.

ВИСНОВКИ

В результаті аналізу результатів комп'ютерного моделювання процесу змішування компонентів у струминному змішувачі з протитечійним способом підведення інжектваного компоненту з'ясовано, що перемішування купажного сиропу з водою відбувається у декількох зонах змішувальної камери, а саме в зоні підводу сиропу, за ввідним патрубком (в цій зоні спостерігається розрідження від 0,2 МПа до 0,1 МПа), а також на звуженні каналу в кінці камери змішування. Всі ефекти перемішування супроводжуються підвищенням тиску в середньому на 50% і зниженням швидкості потоку на 80-85%. Це пояснюється там що на цих ділянках зростає кінетична енергія турбулентності і її дисипація. Збільшення тиску та зменшення діаметру патрубка подачі купажного сиропу призводить до підвищення якості змішування.

В результаті аналітичних досліджень отримана залежність, яка дозволяє визначити мінімальне значення відстані між соплами форсунок для отримання найвищої продуктивності змішувача: $a_{min} = 0,5d_c$. На підставі аналізу математичних залежностей і результатів моделювання процесу струминного змішування у програмному комплексі ANSYS було визначено, що максимальна якість змішування досягається при $a = d_c$.

В результаті експериментальних досліджень впливу основних технологічних і конструктивних параметрів протитечійно-струминного змішувача на забезпечення необхідного вмісту концентрату в готовому розчині показали, що для виготовлення солодкого напою «Лимонад» із використанням концентрату на основі підсолоджувачів (аспартаму і сахарину), діаметрі сопла форсунки 8 мм оптимальними умовами є: відстань між форсунками 24 мм, напір подачі купаного сиропу 200–300 мм, тиск подачі сиропу 1,7–2,2 атм. При таких умовах забезпечується необхідний вміст концентрату в готовому розчині, а також якість перемішування рідких компонентів, яка відповідає технічним вимогам на виготовлення солодких безалкогольних напоїв.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Viunyk O., Samoichuk K., Experimental investigations of the process of mixing liquids in a counter-jet mixer Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі : матер. VI Міжнар. наук.-практ. конф., м. Мелітополь, 02-27 листопада 2025 р. / ТДАТУ. Мелітополь, 2025. С. 501-507.

2. Samoichuk K., Viunyk O. Methodology of conducting studies of jet mixing of liquids // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету : наукове фахове видання / ТДАТУ: гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев.- Мелітополь: ТДАТУ, 2021. – Вип. 21, т. 1.- С. 3-10.

РОЗДІЛ 6

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ МОЛОКА В КЛАПАННИХ ГОМОГЕНІЗАТОРАХ

РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження є процес клапанної гомогенізації молока.

Предметом дослідження є технологічні та конструктивні параметри клапанного гомогенізатора молока

Метою дослідження є підвищення ефективності клапанної головки гомогенізатора за рахунок використання зустрічних струменів для забезпечення середнього діаметру жирових кульок після диспергування на рівні технологічно обумовлених значень та визначення потужності пристроїв для проведення гомогенізації.

Методи дослідження. Для моделювання гідродинамічних процесів використано програмний комплекс кінцево-елементного аналізу ANSYS завдяки можливості оперування великою кількістю параметрів, а також високою точністю результатів.

Геометрична параметризована модель камери гомогенізації, потоку знежиреного молока та струменя вершків камери струминного гомогенізатора з роздільною подачею вершків була створена у програмі Solid Works та інтегрована у програмний Комплекс ANSYS. Для моделювання в ANSYS як змінні фактори, що визначають якість процесу були виділені: тиск молока на вході в головку; відстань між соплами та ширина кільцевих сопел.

Властивості рідини та тиск є не змінними для усіх подальших розрахунків, а форма деталі буде змінюватись враховуючи недоліки попередньої деталі.

Експериментальні дані оброблювались за допомогою методів математичної статистики при використанні мікроскопу з веб-камерою та персонального комп'ютера з використанням табличного процесора Microsoft Excel та програмного забезпечення Mathcad.

Основні результати досліджень:

В роботі наведені теоретичні залежності для визначення основних параметрів диспергування у розробленому пристрої. Обґрунтовано методику проведення експерименту, розроблений пристрій для проведення експериментальних досліджень

Проведені експериментальні дослідження, що дозволили обґрунтувати оптимальні параметри процесу диспергування.

ЖИРОВА КУЛЬКА, КЛАПАННА ГОЛОВКА ГОМОГЕНІЗАТОРА, СТУПІНЬ ДИСПЕРГУВАННЯ, ЗУСТРІЧНІ СТРУМЕНІ.

ВСТУП

Процес приготування однорідних за складом композицій з дисперсних матеріалів шляхом їх гомогенізації в апаратах різних типів широко використовується у молочній промисловості. Гомогенізоване молоко має низку переваг перед незбираним: поліпшені сенсорні та смакові якості, краще засвоєння та менші втрати молочного жиру тощо. Тому гомогенізація молока стала нормативним процесом у більшості сучасних технологічних схем виробництва молочних продуктів: питного стерилізованого та пастеризованого молока, кисломолочних продуктів, морозива, молочних консервів, сиру.

З середини ХХ століття у виробництві для гомогенізації переважно використовувались клапанні гомогенізатори. Незважаючи на їх очевидні недоліки (велике питоме споживання енергії - 6,5...7,6 кВт/т, значна вартість, інтенсивне спрацювання деталей), такі машини є найбільш розповсюдженими і на сучасних підприємствах. Тому актуальним і важливим є необхідність ґрунтовного дослідження механізмів подрібнення жирової фази молока для розробки нових, більш ефективних способів гомогенізації з метою зменшення енергоємності процесу гомогенізації та збільшення ступеня диспергування молочного жиру.

МЕТОДИ І ПРОГРАМА ДОСЛІДЖЕНЬ.

Для одержання теоретичних залежностей параметрів імпульсного гомогенізатора використовували класичні закони гідродинаміки та комп'ютерного моделювання з застосуванням програми Autodesk 3ds Max та універсальної програмної системи кінцево-елементного аналізу AnsysWorkbench. Визначення якості гомогенізації молока проводили з використанням методу вимірювання під оптичним мікроскопом разом з мікрофотографуванням і комп'ютерним аналізом даних.

Експериментальні дані оброблювали за допомогою методів математичної статистики та персонального комп'ютера з використанням табличного процесора Microsoft Excel та програмного забезпечення Mathcad.

Дослідження проводили в лабораторних умовах за традиційними та розробленими методиками.

Програмою досліджень передбачено:

1 – дослідити вплив амплітуди коливання поршня-ударника, частоти коливання, подачі і температури молока на ступінь гомогенізації та перевірити адекватність встановленої аналітично залежності між ними;

2 – дослідити вплив амплітуди коливання поршня-ударника, частоти коливання, подачі на енерговитрати при процесі імпульсної гомогенізації та

ступінь гомогенізації; перевірити адекватність встановленої аналітично залежності між ними;

3 – визначити характеристики дисперсності жирових кульок молока до та після імпульсної гомогенізації і порівняти їх з дисперсністю жиру в молоці після його обробки на клапанному гомогенізаторі.

Гомогенізація молока є важливим етапом переробки молока у молочній промисловості. Гомогенізація молока – це процес дроблення жирів молока і їх рівномірний розподіл по всьому об'єму рідини. Гомогенізація підвищує термін зберігання молочних продуктів, підвищує стійкість при транспортуванні, покращує смакові якості та засвоюваність молока організмом людини. Для гомогенізації молока на підприємствах переважно використовуються гомогенізатори клапанного типу. Принципом роботи клапанного гомогенізатора є продавлювання молока під тиском через кільцевий канал між сідлом і клапаном у клапанній голівці, максимальна ефективність досягається при тиску 25 МПа.

Клапанні гомогенізатори мають такі плюси: високий ступінь гомогенізації молока 0,75 мкм, високий механічний коефіцієнт корисної дії (ККД). Також вони мають ряд недоліків, таких як: високі енерговитрати 7-8 кВт · год/т, складність обслуговування, висока ціна, висока металомісткість, великі розміри, високе спрацювання деталей клапанної головки та плунжерного насосу. Враховуючи недоліки клапанних гомогенізаторів проводились дослідження по розробці нових гомогенізаторів: роторно-пульсаційний, струминний гомогенізатор з роздільною подачею вершків, пульсаційно-поршневий гомогенізатор, пульсаційний апарат з ротором, що вібрує. Данні машини дозволяють зменшити енерговитрати до 1 кВт, але ступінь гомогенізації у таких апаратах менший ніж у клапанних гомогенізаторів.

Серед запропонованих альтернатив є апарат протиточно-струминної гомогенізації. Суть протиточно-струминної гомогенізації полягає у дробленні жирової фази молока за рахунок зіткнення двох струменів. Такий апарат забезпечує ступінь гомогенізації як у клапанних гомогенізаторів, але при цьому має менші енерговитрати.

Для забезпечення найбільшої продуктивності і найкращого ступеня гомогенізації у протиточно-струминних гомогенізаторах повинні виконуватись ряд вимог: відстань між форсунками повинна бути рівною половини діаметра сопла, швидкість молока при виході із форсунок у зустрічних струменів повинна бути однаковою, кут між форсунками повинен дорівнювати 180°.

Протиточно-струминна гомогенізація пропонувалась також у вигляді протиточно-струминної головки для клапанного гомогенізатора. У цьому

випадку пропонується замінити клапанну головку на протиточно-струминну (рис. 1), вона може працювати при тиску 5МПа. Така модернізація має такі плюси: зниження енергозатрат, зниження зносу деталей плунжерного насосу за рахунок зниження робочого тиску, менший знос робочих поверхонь голівки гомогенізатора.

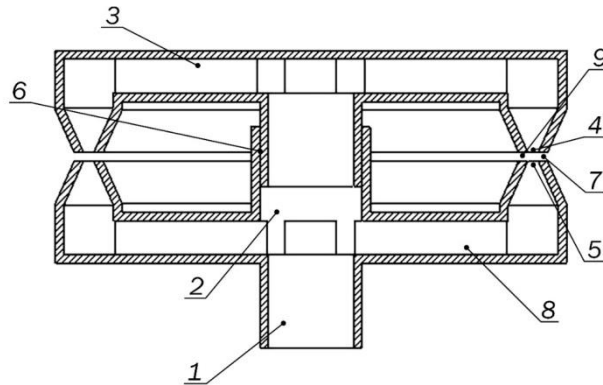


Рис. 1. Схема протиточно-струминної головки клапанного гомогенізатора: 1 – канал подачі, 2 – центральний клапан, 3 – клапан, 4 – кільцеві канали клапана, 5 – кільцевий канал сідла, 6 – ущільнюючі кільця, 7 – зовнішня щілина між клапаном та сідлом, 8 – сідло, 9 – внутрішня щілина між клапаном та сідлом.

Потік початкової грубодисперсної емульсії через канал подачі 1 під тиском надходить до центрального каналу 2, тисне на клапан 3 і, підіймає його на певну висоту, в результаті чого утворюється щілина між сідлом 8 і клапаном 3. Після проходження центрального каналу 2 емульсія розділяється на два протилежно направлені потоки. При проходженні потоків емульсії через кільцеві канали клапана 4 і сідла 5 відбувається їх зіткнення та часткова гомогенізація, а саме взаємопроникнення дисперсних часток одного потоку у дисперсійну фазу іншого, завдяки чому утворюється різниця швидкостей між дисперсною часткою та дисперсійною фазою, необхідна для руйнування дисперсної частки. Після зіткнення двох протилежно направлених потоків емульсія розділяється і проходить через зовнішню 8 та внутрішню 9 кільцеву щілину між сідлом 8 та клапаном 3, де утворюється високий градієнт швидкості потоку, завдяки чому відбувається "просковзування" дисперсної частки відносно дисперсійної фази емульсії (утворюється різниця швидкостей між дисперсною часткою та дисперсійною фазою) і відбувається остаточна гомогенізація емульсії та відведення її з головки гомогенізатора.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для моделювання гідродинамічних процесів використано програмний комплекс кінцево-елементного аналізу ANSYS завдяки можливості

оперування великою кількістю параметрів, а також високою точністю результатів.

Геометрична параметризована модель камери гомогенізації, потоку знежиреного молока та струменя вершків камери струминного гомогенізатора з роздільною подачею вершків була створена у програмі Solid Works та інтегрована у програмний Комплекс ANSYS. Для моделювання в ANSYS як змінні фактори, що визначають якість процесу були виділені: тиск молока на вході в головку; відстань між соплами та ширина кільцевих сопел.

Властивості рідини та тиск є не змінними для усіх подальших розрахунків, а форма деталі буде змінюватись враховуючи недоліки попередньої деталі.

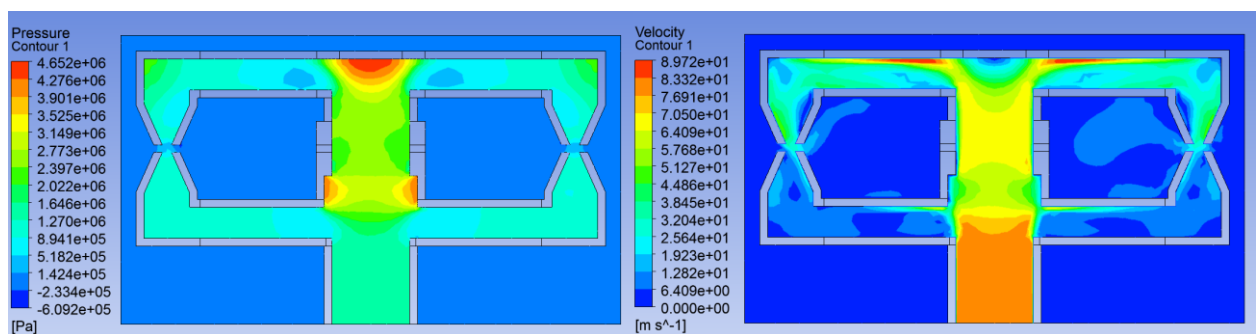
Тиск для розрахунків 5МПа. У таблиці 1 наведені параметри рідини які будуть використовуватись у розрахунках.

Таблиця 1 – Параметри молока для розрахунків

Густина, кг/м ³	1025
Теплопровідність Вт/(м·град)	0.19
В'язкість молока, Па·с	0.0018
Температура С°	60

Для проведення першого розрахунку у Ansys використовується модель яка зображена на рис.1.Результатом розрахунку є схема тиску (рис.2(а)) і

схемашвидкості рідини (рис. 2(б)) у голівці.



(а)

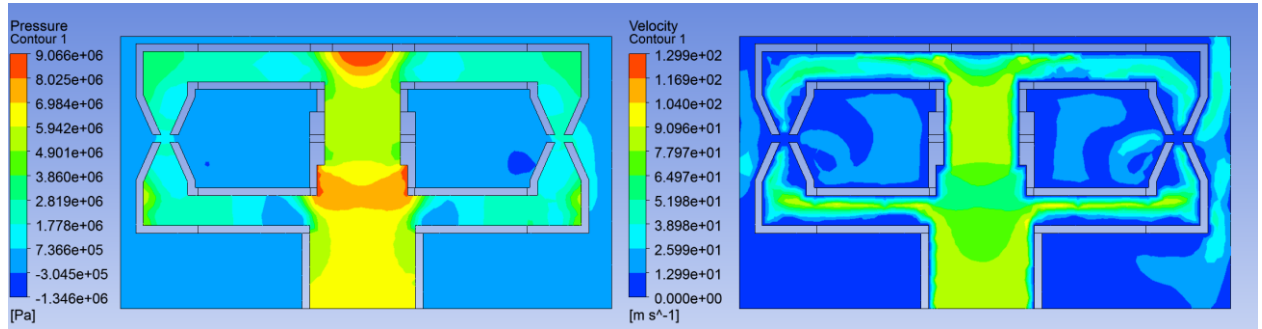
(б)

Рис. 2 – Схема тиску і швидкості рідини у протиточно-струминній голівці

На схемі можна відмітити зони підвищеного тиску у центральному клапані і стінці клапану, тиск у цих зонах досягає 4,6 МПа, тиск у кільцевих каналах сідла і клапану однаковий – 2,8 МПа.

Швидкість у різних зонах голівки: 20м/с у кільцевих каналах сідла, 40 м/с у кільцевих каналах клапану, 76 м/с у каналі подачі, 55-70 м/с у центральному клапані. Швидкість у різних зонах голівки сильно відрізняється, особливо потрібно відмітити різницю швидкостей 1/2 у кільцевих каналах. При такій різниці швидкостей зустрічних струменів не вдасться досягти очікуваного ступеню гомогенізації.

Для збільшення швидкості у сідлі збільшено діаметр каналу подачі
рис. 3.



(a)

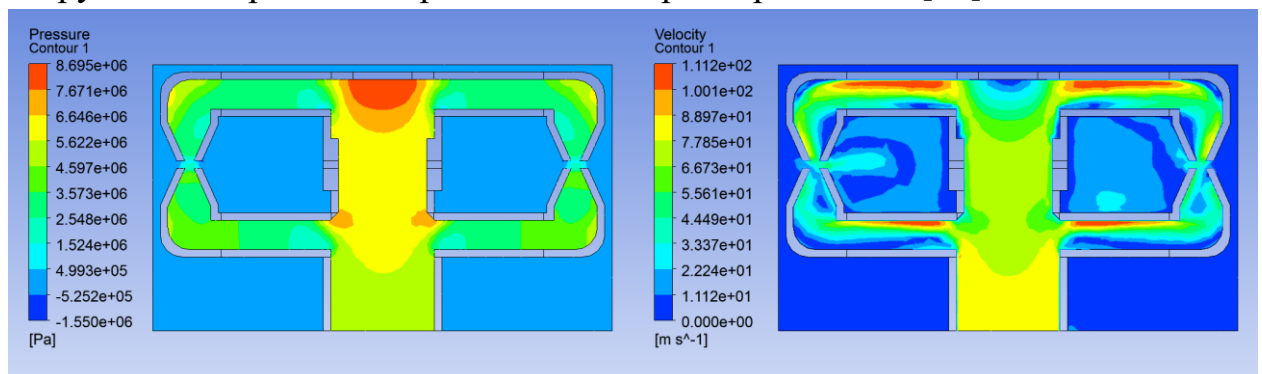
(б)

Рис. 3 – Схема тиску і швидкості у протиточно-струминній голівці

Збільшення діаметру каналу подачі привело до збільшення швидкості рідини у сідлі голівки, швидкість у кільцевих каналах клапану і сідла – 35-40 м/с. Зони підвищеного тиску відповідні першому розрахунку, тиск у каналі подачі – 7 МПа, центральному каналі – 60 МПа, кільцевих каналах сідла і клапану однаковий – 3 МПа[9].

Отже у другій моделі вдалось вирівняти швидкість рідини у голівці, її недоліками є зони підвищеного тиску на стінці клапану і у центральному каналі на входженні клапану у сідло.

Для усунення зони підвищеного тиску у центральному каналі було змінено входження сідла у клапан шляхом збільшення діаметру центрального каналу клапану рис. 4. Форма голівки має багато прямих кутів, додання закруглень покращить гідродинамічні параметри голівки[10].

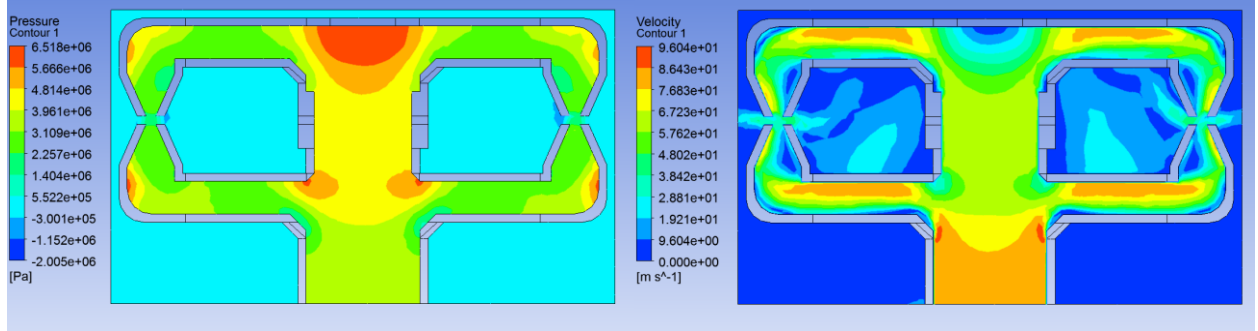


(a)

(б)

Рис. 4 – Схема тиску і швидкості у протиточно-струминній голівці

У третій моделі вдалось локалізувати зону підвищеного тиску у центральному каналі. Зона підвищеного тиску на стінці клапану збільшилась. Тиск у кільцевих каналах клапану і сідла збільшився до 3,5-4 МПа. Швидкість у кільцевих каналах сідла – 45 м/с, а у каналах клапану – 55 м/с. Для забезпечення однакової швидкості рідини у клапані і сідлі зроблено фаски на виходах з каналу подачі і центрального каналу рис. 5.

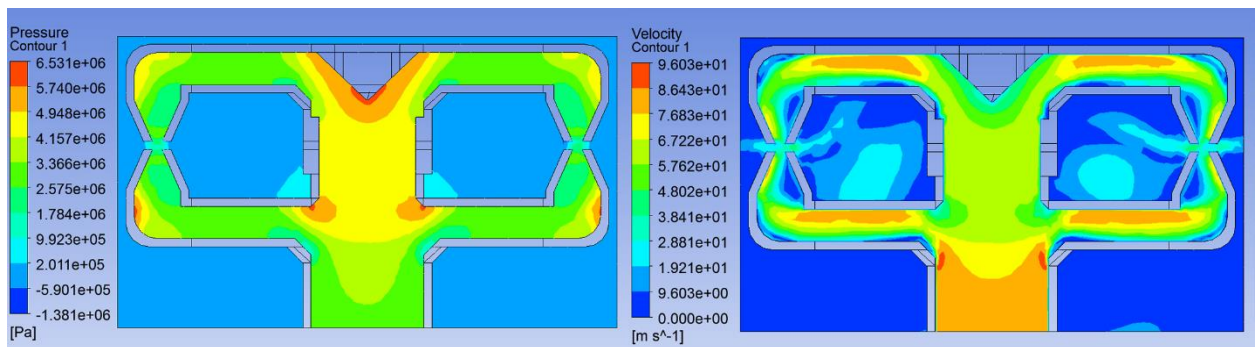


(a)

(б)

Рис. 5 – Схема тиску і швидкості у протиточно-струминній голівці

Додання фасок вирівняло швидкість у кільцевих каналах сідла і клапану – 55 м/с. Максимальний тиск у зонах підвищеного тиску зменшився з 8,6 МПа до 6,5 МПа, зона підвищеного тиску на стінці клапану збільшилась, для її усунення стінка клапану зроблена у формі конусу рис.6.



(a)

(б)

Рис. 6 – Схема тиску і швидкості у протиточно-струминній голівці

Зміна форми стінки клапану привела до зменшення зони підвищеного тиску.

ВИСНОВКИ

Для створення однорідної емульсії жирових компонентів використовують диспергатори. Середній розмір часток жиру у таких

машинах дорівнює близько 2 мкм (на відміну від гомогенізаторів – 1,0 мкм і менше). Підвищення ступеня дисперсності позитивно впливає на засвоювання жиру організмом людини і на органолептичні показники продукту.

Проаналізувавши механізми диспергування у існуючих машинах, можна зробити висновок, що вирішальним фактором є швидкість жирової кульки відносно дисперсійного середовища.

Критерієм руйнування прийнято критерій Вебера. Отримано математичні залежності для визначення: продуктивності диспергатора; витрат енергії на процес диспергування; діаметру кільцевого отвора введення жиру; розміри звуження каналу.

Для проведення експериментальних досліджень процесу диспергування молока розроблено схему та виготовлено експериментальний пристрій. Обґрунтовано вибір вимірювальних пристроїв, встановлені межі варіювання факторів.

Проведені експериментальні дослідження дозволяють стверджувати, що у розробленому диспергаторі при тиску 5 МПа досягається диспергування жирової фази до середнього розміру часток біля 1 мкм, що недосяжно у звичайних диспергаторах, і є можливим лише в клапанних гомогенізаторах при набагато більших енерговитратах.

Під час руху до кільцевих каналів, на виході з яких відбувається гомогенізація, швидкість потоку зменшується в 2–4 рази і відрізняється в зустрічних потоках у 2 рази.

Зона максимальної швидкості потоку рідини концентрується переважно в каналі подачі. При виході з нього вона починає різко зменшуватися. Таким чином, під час руху до кільцевих каналів, на виході з яких відбувається гомогенізація, швидкість потоку зменшується в 2–4 рази і відрізняється в зустрічних потоках у 2 рази. Для ефективної гомогенізації потоки повинні мати однакову швидкість, для чого необхідно збільшити діаметр каналу подачі емульсії в головку.

Представлена конструкція протиточно-струминної головки гомогенізатора має потенціал зменшення питомих енерговитрат у 3 – 5 разів. При такому вдосконаленні відсутня необхідність у закупівлі нового обладнання, а вимагає лише заміни головки клапанного гомогенізатора. Тому описане удосконалення є економічно вигідним на підприємствах де використовуються клапанні гомогенізатори.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Дейниченко Григорій Вікторович, Султанова Валентина Олександрівна, Ялпачик Федір Юхимович, Самойчук Кирило Олегович / Головка гомогенізатора/ Пат. UA106521. 2021.
2. Самойчук К. О., Фучаджи Н.О., Ломейко О. П. Аналіз конструкцій статичних гідродинамічних кавітаторів для безперервного змішування рідин. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання / ТДАТУ, 2022. – Вип. 12, том 2. (12) DOI: 10.31388/2220-8674-2022-2-10
3. Samoichuk, K., Kovalyov, A., Koshulko, V., Tymchak, D., Sova, N. Research of the Annular Gap Parameters of the Jet-Slot Milk Homogenizer. Lecture Notes in Mechanical Engineering, pp. 258–269, 2025. DOI: 10.1007/978-3-031-95218-0_23
4. Palianychka, Nadiiaa; Samoichuk, Kyrylo; Verkholyantseva, Valentyna; Sova, Natalii; Kholobtseva, Iryna. Quality Improvement of Emulsions Dispersion in the Pulsation Homogenizer Using Computer Simulation. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Pages 735 – 745, 2025. 6th DOI: 10.1007/978-3-031-82746-4_65
5. Kyrylo Samoichuk, Alexandr Kovalyov, Nadiia Palianychka, Taras Hutsol, Serhii Komarnitskyi, Olena Bezalychna, Maciej Kuboń, Sylwester Tabor, Valentyna Kukharets. Energy Efficiency Optimization of Milk Homogenizers: A Contribution to the European Green Deal Goals. Production engineering archives. 2025, 31(1), 15-26. DOI: 10.30657/pea.2025.31.2
6. Samoichuk K., Palianychka N., V. Verkholyantseva, A. Kovalyov, D. Dmytrevskyi, D. Horielkov, V. Chervonyi, V. Voitsekhivskyi. Analysis of the hypotheses of milk fat phase dispersion and structural features of homogenizers. Chapter 3. Food technology progressive solutions. 2024 Scientific Route OÜ. DOI: <https://doi.org/10.21303/978-9916-9850-4-5.ch3>
7. Самойчук К. О., Паляничка Н. О., Верхоланцева В. О. Дослідження вискоєфективного обладнання для гомогенізації дрібнодисперсних емульсій з використанням комп'ютерного моделювання // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету : наукове фахове видання / ТДАТУ: гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев.- Мелітополь: ТДАТУ, 2021. – Вип. 21, т. 1.- С. 84-92.

РОЗДІЛ 7

МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СТРУМИННИХ ГОМОГЕНІЗАТОРІВ МОЛОКА

РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження є процес струминно-щілинної гомогенізації молока з роздільною подачею вершків.

Предметом дослідження є закономірності впливу технологічних, конструктивних та гідравлічних параметрів струминно-щілинного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків на його якісні та енергетичні показники.

Метою дослідження є розробка методології дослідження параметрів струминних гомогенізаторів молока.

Методи досліджень. Поставлені задачі вирішувались з використанням теоретичного інструментарію, серед якого: теорії граничного шару Шліхтінга, затоплених струменів, залежності класичної гідродинаміки, локальної ізотропної турбулентності Колмогорова-Обухова, моделювання процесу в програмному комплексі кінцево-елементного аналізу ANSYS з попереднім створенням геометричної моделі камери в програмі Solid Works.

Основні результати досліджень: було запропоновано методологію дослідження параметрів струминних гомогенізаторів молока. Розроблено та наведено структурну схему проведення досліджень параметрів гомогенізаторів молока струминного типу. Наведено деталізований опис програми теоретичних досліджень та стадій її розробки. Представлено етапи розробки програми проведення експериментальних досліджень, що включають комплекс дій від обрання змінних факторів до визначення оптимальних величин цих параметрів та залежностей, що пов'язують їх з показниками якості та енергетичних витрат гомогенізатора. Наведена методологічна основа розробки методики обчислення параметрів промислового зразку та оцінки ефективності його впровадження в умовах реального виробництва.

МЕТОДОЛОГІЯ, ПАРАМЕТРИ, ДИСПЕРГУВАННЯ, КАНАЛ ПОДАЧІ, ВЕРШКИ, СТРУМИННИЙ ГОМОГЕНІЗАТОР, МОЛОКО

ВСТУП

Диспергування за рахунок зменшення середнього діаметру жирових кульок забезпечує рівномірний розподіл вершків в молочній плазмі. Її метою

є зменшення середнього діаметру жирових кульок з 3–4 мкм до 0,75–0,85 мкм в готовому продукті, такі показники дисперсності знаходяться на рівні вимог нормативної документації, що регулює показники якості молочних виробів після переробки. Між тим, найбільш поширені в промисловості клапанні гомогенізатори, що забезпечують СЖК на рівні 0,75–0,80 мкм мають надто високі питомі витрати електричної енергії, що сягають близько 7–8 кВт·год/т переробленого молока]. Відсоток енергетичних витрат на диспергування складає близько 30–40% в загальних технологіях переробки молока та молочних продуктів. Отже, зниження енергоємності процесу являє собою актуальну та важливу задачу для спеціалістів переробної галузі та науковців за фахом.

Дослідження гомогенізації в сучасних конструкціях, які забезпечують високу енергоефективність диспергування характеризується складністю візуального спостереження за їх деформацією та подальшим руйнуванням. Це пояснюється високими швидкостями руху молока (що для клапанного гомогенізатора перевищують 100 м/с), низьким ступенем прозорості молочної емульсії та мікроскопічними показниками середнього діаметру жирових кульок, що складають близько 1 мкм. Сукупна дія цих чинників обумовила відсутність єдиної теорії диспергування та дозволила дослідникам процесу висунути близько 10 гіпотез, що мають суперечності та частково спростовують одна іншу. Створені на базі цих гіпотез конструкції або відрізняються високими значеннями питомих витрат енергії (мікрофлюїдизатори, клапанні), або не забезпечують зменшення СЖК до 0,75–0,85 мкм (вібраційні, електрогідравлічні, вакуумні).

Результати останніх досліджень дозволяють виділити в якості основного чинника, що спричинює деформацію та руйнування жирових кульок критерій Вебера. Його значення зростає при збільшенні швидкості ковзання жирових кульок відносно молочної плазми. Відтак створення енергоефективних конструкцій гомогенізаторів має ґрунтуватись на створенні максимальної різниці між швидкостями руху знежиреного молока та вершків. Одночасно зі створенням сприятливих умов для руйнування жирових кульок при цьому використовується принцип роздільної подачі вершків, що дозволяє знизити енергетичні витрати процесу на 40–60%. Цим вимогам відповідає група струминних гомогенізаторів молока. Їх використання забезпечує зменшення середнього діаметру жирових кульок до 0,75–1,20 мкм, при цьому питомі енерговитрати таких конструкцій не перевищують 0,9–1,8 кВт·год/т. Однак незважаючи на перспективність розробки енергоефективних конструкцій цієї групи гомогенізаторів на теренах Інтернету відсутня узагальнююча інформація щодо методології

проведення їх досліджень. Цей факт пригальмовує подальші дослідження та розробку енергоефективних конструкцій диспергаторів цієї групи.

ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Поставлені задачі вирішувались з використанням теоретичного інструментарію, серед якого: залежності класичної гідродинаміки, теорії затоплених струменів, граничного шару Шліхтінга, локальної ізотропної турбулентності Колмогорова-Обухова, моделювання процесу в програмному комплексі кінцево-елементного аналізу ANSYS з попереднім створенням геометричної моделі камери в програмі Solid Works. Отримані в ході проведення аналітичних досліджень залежності свідчать про наявність зв'язку між формою внутрішніх поверхонь кільцевої щілини якістю та енерговитратами гомогенізації. Таким чином метою досліджень є обґрунтування оптимальної форми профілю внутрішніх поверхонь конфузору та кільцевої щілини струминно-щілинного гомогенізатора молока.

Програмою досліджень передбачено:

Для досягнення поставленої мети вирішувалось наступні задачі:

- розробка структурної схеми проведення досліджень струминного гомогенізатора молока;
- розробка програми теоретичних досліджень, метою яких є обґрунтування параметрів та режимів роботи лабораторного зразку гомогенізатора для отримання дисперсності молочної емульсії, на рівні технологічних вимог при мінімальних енерговитратах процесу;
- розробка програми експериментальних досліджень, головною метою яких є перевірка адекватності отриманих аналітичних залежностей лабораторного зразку струминного гомогенізатора молока, встановлення реальних значень введених коефіцієнтів, перевірка та при необхідності уточнення значення критерію Вебера;
- розробка методики обчислення параметрів та конструкції промислового зразку гомогенізатора.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Аналіз літературних джерел дозволив визначити, що проведення досліджень руйнування жирових кульок в струминних гомогенізаторах являє найбільш перспективний напрямок підвищення енергоефективності диспергування в технологічних процесах переробної промисловості. До

групи струминних гомогенізаторів молока належать: струминний в об'ємі, струминно-ударний, струминний із зустрічною подачею вершків, протитечійно-струминний (ПСГМ), струминний з роздільною подачею вершків (СГРПВ) та струминно-щілинний диспергатори молока (СЩГМ). Останні 3 конструкції були розроблені на базі кафедри ОПХВ імені професора Ф. Ю. Ялпачика (ТДАТУ імені Дмитра Моторного).

Диспергування жирової фази в ПСГМ здійснюється при зіткненні струменів молока, що подаються крізь дві співвісно розташовані форсунки. Конструктивні особливості будови гомогенізатора дозволяють створити високу швидкість ковзання жирової кульки по відношенню до молочної плазми. Це призводить до підвищення значень гідродинамічного критерію Вебера, що обумовлює ефективне руйнування часток жирової фази. Згідно результатів досліджень при переробці молока в ПСГМ середнього діаметру жирових кульок складає близько 0,75–0,85 мкм, при цьому його питомі енерговитрати не перевищують 1,6–1,8кВт·год/т.

В СГРПВ після попередньої сепарації знежирене молоко та вершки подаються окремо, до швидкісного потоку знежиреного молока подається струмінь вершків. Завдяки використанню тонких каналів подачі вершків та малого діаметру струменю забезпечується висока швидкість ковзання жирових кульок. Збільшення гідродинамічного критерію Вебера обумовлює зниження середнього діаметру жирових кульок при використанні гомогенізаторів цього типу до 0,80–0,90 мкм. Використання принципу роздільної подачі вершків забезпечує зниження питомих енерговитрат таких конструкцій до 0,85–0,90кВт·год/т.

В СЩГМ дисперсна фаза подається до швидкісного потоку знежиреного молока, що пройшло попередню сепарацію, крізь вузьку кільцеву щілину. Згідно результатів проведених досліджень при його використанні можливо отримати жирові кульки середнім діаметром 0,8–0,9 мкм. При цьому питомі енергетичні витрати гомогенізатора не будуть перевищувати 0,7–0,8 кВт·год/т гомогенізованої емульсії.

Визначення раціональних та оптимальних значень конструктивних, гідравлічних та технологічних параметрів з точки зору зменшення подальшої кількості пошукових експериментів та загального обсягу досліджень доцільно починати з проведення моделювання. Серед програм, які використовуються для моделювання гідродинамічних процесів COSMOS, AutoCAD, Solid Works. Програмний комплекс кінцево-елементного аналізу ANSYS було обрано завдяки наявності таких переваг, як висока точність програми; можливість оперування великою кількістю параметрів процесу, забезпечення при використанні програми значень густини, в'язкості

знежиреного молока та вершків, які є найбільш наближеними до їх реальних значень. Спочатку авторами в програмному комплексі Solid Works було створено геометрично параметризовану модель камери, струменю вершків та потоку знежиреного молока, які згодом було інтегровано до програмного комплексу ANSYS.

Після обрання програмного комплексу проводиться обґрунтування межі варіювання значень параметрів, які будуть досліджуватись. Для ПСГМ ними можуть бути, наприклад відстань між форсунками, тиск диспергування, для СГРПВ відповідно тиск подачі знежиреного молока та діаметр каналів подачі вершків, для СЦГМ окрім тиску подачі дисперсійної фази (Δp_{zn}), ширина кільцевої щілини (h) (рис.1).

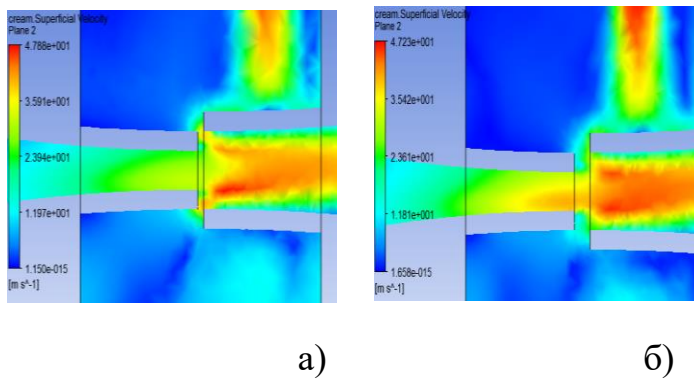


Рисунок 1. Поля швидкостей при тиску подачі знежиреного молока $\Delta p_{zn}=8$ МПа та ширині кільцевої щілини h : а) $h=0,4$ мм; б) $h=1,2$ мм

На етапі проведення аналітичних досліджень важко оцінити вплив деяких факторів на показники якості процесу диспергування. Тому для оцінки значення реальних величин можна використовувати неявні залежності (коефіцієнти) впливу параметрів, у СГРПВ каналів подачі вершків, у СЦГМ, відповідно параметрів кільцевої щілини. Цей коефіцієнт ($k_{щ}$) у випадку СЦГМ уточнював вплив жирності вершків, ширини кільцевої щілини та швидкості подачі вершків на показники якості диспергування в СЦГМ.

Наступним кроком є знаходження залежностей, що пов'язують конструктивні, технологічні та гідравлічні параметри досліджуваного гомогенізатора з середнім діаметром жирових кульок (d_{cp}) після диспергування. Поставлені задачі вирішувались з використанням теоретичного інструментарію, серед якого: залежності класичної гідродинаміки, теорії затоплених струменів, граничного шару Шліхтінга, локальної ізотропної турбулентності Колмогорова-Обухова. Наприклад, для СГРПВ така залежність має вигляд (1)

$$d_{cp} = \frac{We_k \sigma_{жс-n} \varepsilon_k^2 s^2}{2 \rho_{пл} k_c^2 Q_{zn}^2} \cdot \quad (1)$$

де We_k – критичне значення критерію Вебера;
 k_c – коефіцієнт струминної гомогенізації;
 $\sigma_{ж-п}$ – поверхневий натяг на межі розділу жиру та плазми, Н/м;
 ϵ_k – коефіцієнт стиснення для центральної частини камери, який залежить від форми профілю внутрішніх поверхонь камери;
 s – площа каналів подачі вершків, м²;
 $Q_{зн}$ – подача знежиреного молока, м³/с;
 $\rho_{пл}$ – густина молочної плазми, кг/м³.

Отримана формула (1) може бути представлена в вигляді графічних залежностей, що дає змогу визначити раціональні величини параметрів процесу диспергування з точки зору мінімізації середнього діаметру жирових кульок. На підставі отриманої залежності (1) можна виразити до яких значень мають прямувати параметри процесу диспергування для забезпечення мінімально можливих величин середнього діаметру жирових кульок після диспергування (2) [3]

$$\left(We_k, \sigma_{ж-п}, \epsilon_k, d_k \right) \rightarrow \min; \left(k_{щ}, Q_{зн} \right) \rightarrow \max. \quad (2)$$

Наступним кроком є аналітичне знаходження залежностей, які пов'язують конструктивні, гідравлічні та технологічні параметри гомогенізатора з потужностями для його приводу (від гідроциліндру у випадку ПСГМ та від насосів подачі знежиреного молока та вершків у випадку СГПРВ та СЦГМ) та питомими енерговитратами диспергування. Така залежність може мати вигляд, подібний до формули, що пов'язує параметри гомогенізатора та питомі витрати енергії для СЦГМ (3)

$$E_{пит} = \frac{Q_{зн}^2 \left(\frac{8 \cdot \rho_{зн}}{\mu_k^2 \cdot d_k^4} + \left(\frac{Ж_n - Ж_{зн}}{Ж_v - Ж_n} \right)^3 \cdot \frac{\rho_v}{2 \cdot d_k^2 \cdot h^2 \cdot \mu_{щ}^2} \right)}{\pi^2 \cdot \rho_m \cdot \left(\frac{Ж_v - Ж_{зн}}{Ж_v - Ж_n} \right)}. \quad (3)$$

де ρ_m – густина молочної плазми, кг/м³;
 d_k – діаметр конфузору в місці найбільшого звуження, м.
 ρ_v – густина вершків, кг/м³;
 h – ширина кільцевої щілини, м;
 $Ж_{зн}$, $Ж_v$, $Ж_n$ – жирності відповідно знежиреного молока, вершків та нормалізованої емульсії, %;

μ_k , $\mu_{щ}$ – коефіцієнти витрат відповідно конфузора та кільцевої щілини, які враховують гідродинамічні умови на ділянці надходження вершків до потоку знежиреного молока.

Отримана формула (3) може бути представлена в вигляді графічних залежностей, що дає змогу визначити раціональні величини параметрів процесу диспергування з точки зору мінімізації питомих витрат енергії. Залежність (3) дає змогу виразити до яких значень мають прямувати параметри процесу диспергування для забезпечення мінімально можливих величин питомих витрат енергії (4).

$$\begin{aligned} (\mu_k, \mu_e, h, \mathcal{J}_e) &\rightarrow \max \\ (Q_{zn}, \mathcal{J}_n) &\rightarrow \min \end{aligned} \quad (4)$$

Отриманих даних достатньо для проведення оптимізації. Процес диспергування молока в має забезпечувати зменшення середнього діаметра жирових кульок до рівня 0,75–0,80 мкм при мінімальних енергетичних витратах. Гідравлічні, конструктивні і технологічні параметри гомогенізатора, які відповідають таким вимогам, будемо вважати оптимальними. Для визначення оптимальних параметрів гомогенізатора молока необхідно побудувати лінії рівної дисперсності на графіках залежностей питомих витрат енергії $E_{пит}$ при різних величинах раціональних значень довжини кільцевої щілини $l_{щ}$ (8,4–9,4) і різних формах профілю внутрішніх поверхонь конфузору, визначених при проведенні аналітичних досліджень струминно-щілинного гомогенізатора. Після цього за даними, визначеними з експериментальних графіків на рівні, необхідному для забезпечення середнього діаметра жирових кульок на рівні вимог нормативної документації проводиться лінія рівної дисперсності, позначена на обох графіках суцільною лінією. На перетині лінії рівної дисперсності, що має значення 0,8 мкм з кожною з кривих у легенді, знаходимо відповідні значення питомих витрат енергії. Нанесемо знайдені значення питомих витрат енергії на попередньо побудовані графіки залежності питомих витрат енергії гомогенізатора від довжини кільцевої щілини при різних типах внутрішнього профілю конфузору.

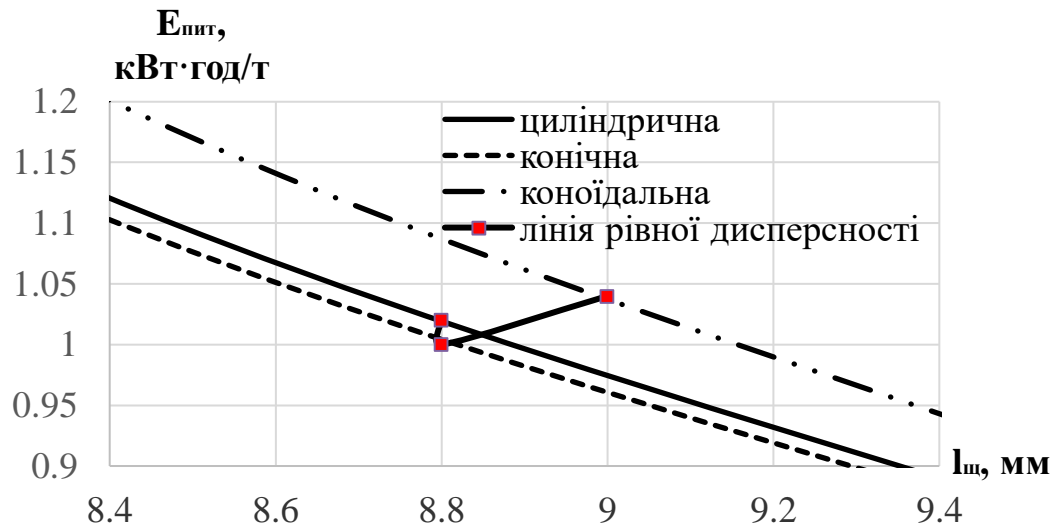


Рисунок 2. Оптимізація форми внутрішніх поверхонь камери та діаметра конфузору в місці найбільшого звуження камери струминно-щілинного гомогенізатора молока (при $J_{зн}=0,05\%$; $J_{н}=3,5\%$; $J_{в}=40\%$; $h=0,5$ мм; $\mu_{в}=0,1$; $Q_{г}=1000$ кг/год)

Перед проведенням експериментальних досліджень визначаються сталі та обираються змінні фактори процесу, як показано на рис.3 для СЦГМ.

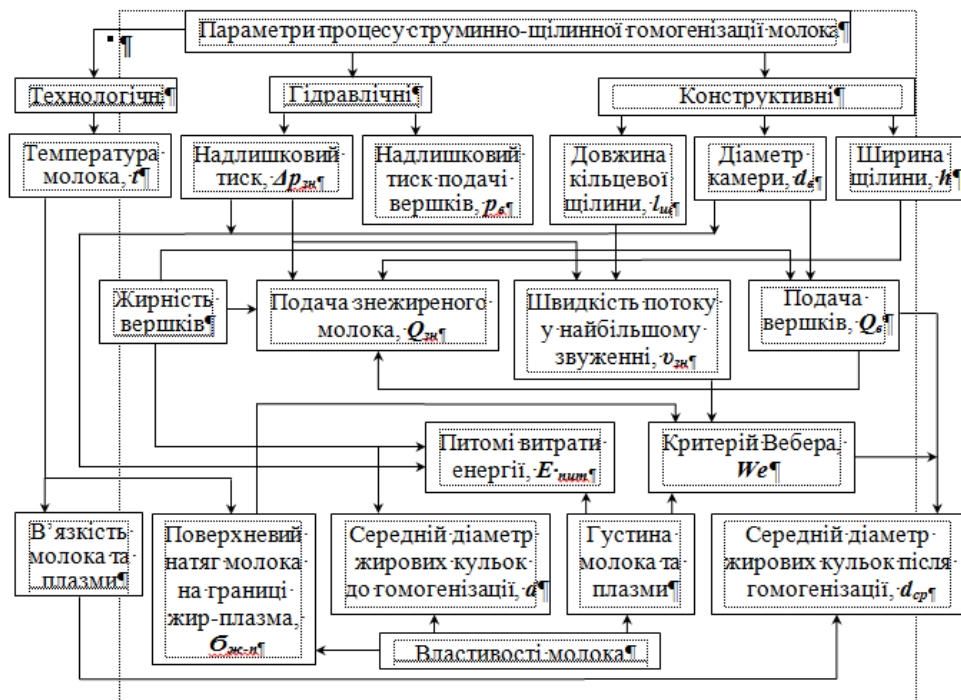


Рисунок 3. Блок-схема взаємозв'язку основних факторів, вихідних параметрів та критеріїв оптимізації в струминно-щілинному гомогенізаторі молока

Наприклад у випадку з СГПРВ ними були швидкості подачі знежиреного молока, вершків, жирність вершків, площа каналів подачі вершків тощо. Після цього здійснювалось обґрунтування діапазону

варіювання кожного зі змінних факторів процесу. Наприклад жирність характеризує відсоткову кількість жирової фази в загальному об'ємі вершків. При використанні вершків жирністю нижче за 10% спостерігається суттєве зростання питомих енерговитрат. Це пов'язано з необхідністю подачі жирової фази з більшою швидкістю для забезпечення необхідної жирності нормалізованого продукту. Також не рекомендовано використовувати вершки, жирність яких перевищує 50%. Це пов'язано зі значним зростанням витрат енергії, що необхідні для проведення додаткової гомогенізації при використанні вершків високої жирності.

Отриманих даних досліджень достатньо для здійснення обґрунтування схеми лабораторного зразку гомогенізатору та створення його в металі. Наступним кроком є планування експерименту за рівнями варіювання факторів та обґрунтування вибору засобів контролю параметрів при проведенні експериментальних досліджень. На цьому ж етапі відбувається обґрунтування методів контролю якості гомогенізації. Обраний метод мікрофотографування дозволяє не тільки визначати середній діаметр жирових кульок, а й оцінити їх розподіл за розмірними групами. Дисперсний склад жирових кульок після гомогенізації визначався за допомогою оптичного мікроскопу Микромед Р-1-LED загальною кратністю збільшення 1500 крат. До нього приєднувалась цифрова камера Mustek Wcam 300 з роздільною здатністю 640x480.

З отриманих при проведенні експериментальних досліджень даних були складені матриці, які оброблялися на персональному комп'ютері за допомогою програм Mathcad та Microsoft Office Excel 2010 за обраною методикою. Розраховувались дисперсії достовірності, однорідність дисперсії за критерієм Кохрена). Перевірку значущості коефіцієнтів отриманих рівнянь регресії проводили за критерієм Стьюдента, а похибку апроксимації дослідних даних—за критерієм Фішера. Рівень значущості приймали рівним 0,05.

Отримані дані заносились до спеціальних таблиць, згідно розмірних класів, де до кожного класу належала група жирових кульок певного розміру. За визначальний розмір класу приймався максимальний розмір жирової кульки даної групи. У полі зору мікроскопа підраховувались кількість жирових кульок та їх діаметр. Шляхом оцінки максимальних коливань діапазону значень результатів дослідів виключалися грубі помилки вимірів. Внаслідок обробки було отримано розподіл розмірів жирових кульок в інтервалі класу за їх кількістю шляхом обробки сукупності одиниць, відібраних для контролю з партії. Обчислення основних параметрів вибірки, виконувалось за допомогою програми Microsoft Office Excel 2010.

Отримані результати можуть бути представлені в вигляді графічних залежностей, що дає змогу визначити раціональні та оптимальні величини параметрів процесу диспергування з точки зору отримання продукту з мінімальними значеннями середнього діаметра жирових кульок СЦГМ (рис.4) або мінімізації питомих витрат енергії.

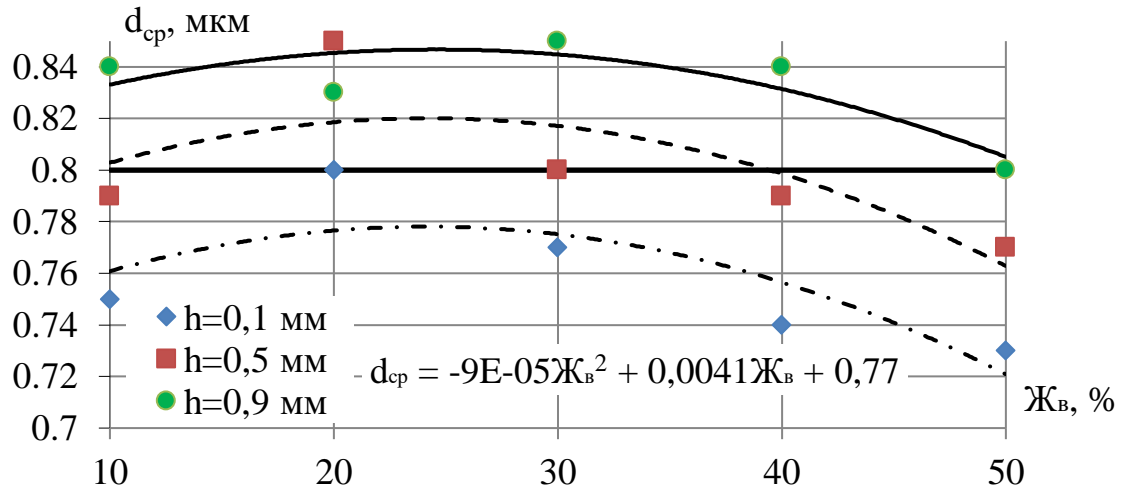


Рисунок 4. Графік залежності середнього діаметра жирових кульок d_{cp} від жирності вершків $Ж_в$, та ширини щілини камери гомогенізації в місці найбільшого звуження h при $Ж_н=3,5\%$, $d_k=3$ мм, $v_{zn}=60$ м/с

Для знайдених раціональних параметрів гомогенізатора, після аналізу мікрофотографій будувалась гістограма розподілу середнього діаметра жирових кульок по розмірних групах, визначалась дисперсія та коефіцієнт варіації, як для СЦГМ (рис.5)

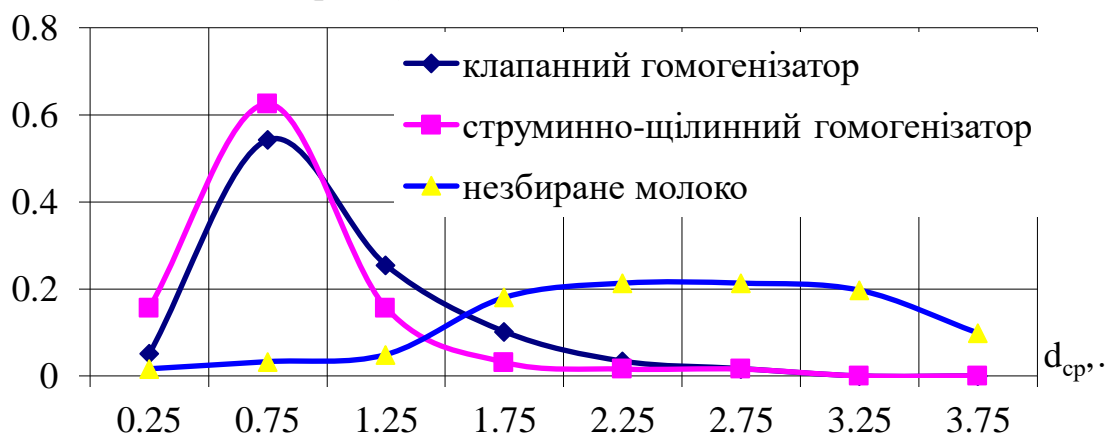


Рисунок 5. Гістограма розподілу середнього діаметру жирових кульок за розмірними групами: *a* – після струминно-щілинної гомогенізації; *б* – після струминної гомогенізації з роздільним подаванням жирової фази; *в* – необробленого молока

Оскільки на етапі аналітичних досліджень для уточнення впливу параметрів каналу подачі вершків у СГПРВ та кільцевої щілини у СЦГМ вводились коефіцієнти, наприкінці експериментальних досліджень

	r_i $d_{\text{кам}},$ мм	$d_B, \text{ мм}$	лів N	$P_B, \text{ кВт}$	молока, $P_{\text{зн}}, \text{ кВт}$	$P, \text{ кВт}$	вання, $E_{\text{пит}}$ кВт·год/т
1,0	2,2	1,4	2	0,10	0,7	0,8	0,8
2,5	3,6	2,2	2	0,18	1,8	2,0	0,8
5,0	5,0	3,0	2	0,35	3,6	4,0	0,8
10,0	4,4	2,8	2	0,72	7,2	7,9	0,8

Отримані результати дали необхідну інформацію для розробки рішення промислового зразку, обрання необхідних технологічних ємностей, камери гомогенізації, насосів, двигунів, редукторів, з'єднувальної арматури та контрольно-регулюючої апаратури. Розроблені та втілені в металі промислові зразки гомогенізатора проходили випробування та перевірку показників роботи в умовах масложирового комбінату «Південний». Отримані при випробуванні техніко-економічні показники використовувались для оцінки економічної ефективності впровадження результатів досліджень в якості заміни найбільш енерговитратним конструкціям клапанних гомогенізаторів. Обчислення економічної ефективності проводилось за загальноприйнятою методикою з визначенням річного економічного ефекту, ступеню зниження енерговитрат, терміну окупності тощо.

ВИСНОВКИ

Необхідність розробки методології досліджень параметрів струминних гомогенізаторів молока обумовлена відсутністю узагальнюючої інформації, що полегшує проведення досліджень нових типів енергоефективних гомогенізаторів цієї групи. Розроблена структурна схема проведення досліджень структурує послідовність дій, які повинен виконати науковець для перевірки робочої гіпотези досліджень.

Детальний опис етапів програми аналітичних досліджень та стадій її розробки дозволяє скоротити час, який раніше витрачався на планування етапів проведення досліджень. Надана послідовність розробки та реалізації програми проведення експериментальних досліджень дозволяє скоротити обсяг досліджень до необхідної та достатньої кількості для перевірки адекватності залежностей, отриманих аналітичним шляхом.

Рекомендації відносно розробки методики обчислення параметрів та розробки промислового зразка узагальнюють інформацію, здобуту авторами при проведенні досліджень створених на базі кафедри ОПХВ новітніх конструкцій енергоефективних гомогенізаторів молока. Матеріали статті можуть бути використані при проведенні досліджень перспективних та малодосліджених конструкцій диспергаторів, наприклад струминного гомогенізатора молока з зустрічною подачею вершків.

Дослідження виконано в рамках науково-технічної роботи "Розроблення технології переробки молочних продуктів з використанням нових типів гомогенізаторів", яка фінансується МОН за договором № ДЗ/132 - 2022.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Bratishko V, Kovalov O. Economical efficiency of using a dispergator jet-slot type. Проблеми та перспективи розвитку агропромислового комплексу України: матеріали II Всеукраїн. наук.-практ. Інтернет-конференції / ТДАТУ: ред. кол. С. В. Кюрчев, О.В. Пеньов, Е. К. Посвятенко [та ін.]. - Мелітополь: ТДАТУ, 2021. – 113– 115 с.

2. Самойчук К. О., Ковальов О. О. Шляхи підвищення якості диспергування в клапанних гомогенізаторах молока // Новації в технології та обладнанні готельно-ресторанних, харчових і переробних виробництв: друга міжнародна науково-практична інтернет-конференція, 23 листопада 2021 р. : [матеріали конференції] / під заг. ред. В.М. Кюрчева. – Мелітополь : ТДАТУ, 2021. С. 26-28.

3. Ковальов О. О., Самойчук К.О., Паляничка Н.О. Оцінка впливу турбулентних пульсацій та квазістатичного руйнування жирових кульок в струминному гомогенізаторі молока Інтеграційні та інноваційні напрями розвитку харчової індустрії: Матеріали шостої міжнародної науково-практичної конференції (3-4 листопада 2022 року). Черкаси: ЧДТУ, 2022. С. 100-103.

4. Ковальов О.О., Самойчук К.О., Паляничка Н.О. Зниження енергоємності при використанні роздільного способу диспергування молока. Сучасна інженерія агропромислових і харчових виробництв: Матеріали міжнародної науково-практичної конференції (24-25 листопада 2022 року). Харків: ДБТУ, 2022. С. 164-165.

5. Palianychka N, Samoichuk K, Kovalyov A. Application of computer simulation for researching the process of milk emulsion dispersion. Інтеграційні

та інноваційні напрями розвитку харчової індустрії: Матеріали шостої міжнародної науково-практичної конференції (3-4 листопада 2022 року). Черкаси: ЧДТУ, 2022. С. 110-115.

6. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Перспективні шляхи підвищення енергоефективності диспергування. Сучасна інженерія агропромислових і харчових виробництв: Матеріали міжнародної науково-практичної конференції (24-25 листопада 2022 року). Харків: ДБТУ, 2022. С. 156-157.

7. Самойчук К.О., Ковальов О.О., Паляничка Н.О. Перспективний напрямок зниження енерговитрат диспергування. Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі»(01-25 листопада 2022 р.), с.108-111.

8. Tkach V, Kovalov O. Principles of jet-slit homogenizer of milk with separate supply of cream. Проблеми та перспективи розвитку агропромислового комплексу України: матеріали II Всеукраїн. наук.-практ. Інтернет-конференції / ТДАТУ: ред. кол. С. В. Кюрчев, О.В. Пеншов, Е. К. Посвятенко [та ін.]. - Мелітополь: ТДАТУ, 2021. – 125– 127 с.

9. Ковальов О. О. Підвищення засвоюваності коров'ячого молока при годуванні дитини. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали III Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції (Мелітополь, 01-26 листопада 2021 р.) / ТДАТУ: ред. кол. В. М. Кюрчев, В. Т. Надикто, О. Г. Скляр [та ін.]. - Мелітополь: ТДАТУ, 2021. - 391-394 с.

10. Ковальов О. О., Самойчук К. О., Тарасенко В. Г. Процеси, які відбуваються в зоні граничного шару струминно – щілинного гомогенізатора молока // Новації в технології та обладнанні готельно-ресторанних, харчових і переробних виробництв: друга міжнародна науково-практична інтернет-конференція, 23 листопада 2021 р. : [матеріали конференції] / під заг. ред. В.М. Кюрчева. – Мелітополь : ТДАТУ, 2021. С. 48-51.

11. Самойчук К. О., Ломейко О. П., Ковальов О. О. Визначення розмірних критеріїв гомогенізації жирових кульок молока // Новації в технології та обладнанні готельно-ресторанних, харчових і переробних виробництв: друга міжнародна науково-практична інтернет-конференція, 23 листопада 2021 р. : [матеріали конференції] / під заг. ред. В.М. Кюрчева. – Мелітополь : ТДАТУ, 2021. С. 117-119.

12. Samoichuk, K.; Kovalyov, A.; Fuchadzhy, N.;Hutsol, T.; Jurczyk, M.; Pajak, T.; Banaś, M.; Bezalychna, O.; Shevtsova, A. Energy Costs Reduction for Dispersion Using a Jet-Slot Type Milk Homogenizer. *Energies* 2023, 16, 2211.

29. Ковальов О. О., Самойчук К. О., Фучаджи Н.О., Паляничка Н.О. Оцінка перспектив розвитку молочних автоматів і економічної ефективності

їх оснащення гомогенізаторами. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання / ТДАТУ, 2022. – Вип. 12, том 3. (12)

13. Ковальов О.О. Самойчук К.О. Паляничка Н.О. Оптимізація форми внутрішніх поверхонь кільцевої щілини струминного гомогенізатора молока. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання /. Запоріжжя: ТДАТУ. – 2022. Вип. 12, том 4.

14. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Фучаджи Н.О. Методика розрахунку параметрів промислового зразка струминно-щілинного гомогенізатора молока. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання/. Запоріжжя: ТДАТУ – 2022. Вип. 12, том 4.

15. Паляничка Н. О., Верхованцева В. О., Червоткіна О. О., Ковальов О. О. Обґрунтування розробки лабораторної установки імпульсного гомогенізатора Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. – Мелітополь: ТДАТУ, 2023. – Вип. 13.

16. Кюрчев С. В., Самойчук К. О. Розробка технології виробництва молочних вершків із застосуванням струминного та пульсаційного гомогенізаторів. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання. Запоріжжя: ТДАТУ, 2025. 15(1), 121-128.

17. Кюрчев С. В., Самойчук К. О., Ломейко О. П. Методика розрахунку експериментального зразка струминного гомогенізатора молока. Вип. 13. Т.1. 1. DOI: 10.31388/2220-8674-2023-1 -1

РОЗДІЛ 8

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ДИСПЕРГУВАННЯ ЕМУЛЬСІЇ В ІМПУЛЬСНОМУ ГОМОГЕНІЗАТОРІ

РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження є процес імпульсної гомогенізації молока.

Предметом дослідження є особливості впливу технологічних, конструктивних і гідравлічних параметрів імпульсного гомогенізатора на його якісні та енергетичні характеристики.

Метою дослідження є дослідження процесу диспергування молочного жиру в імпульсному гомогенізаторі молока, з метою впровадження даного типу обладнання у технологічну лінію виробництва молочної продукції на молокопереробних підприємствах.

Методи дослідження. Поставлені завдання виконувалися із застосуванням теоретичного інструментарію, що включав класичні гідродинамічні залежності та моделювання в Ansys Workbench, фізико-хімічні підходи, методи математичної статистики із використанням мікроскопа з вебкамерою, а також аналіз даних на персональному комп'ютері в табличному процесорі Microsoft Excel і програмному середовищі Mathcad.

Основні результати дослідження: виконано огляд сучасних типів гомогенізаторів, що застосовуються для диспергування молочного жиру. Визначено, що імпульсний гомогенізатор є найбільш перспективним обладнанням для отримання продукції високої якості за умов знижених енерговитрат. Проведено дослідження ефективності процесу диспергування жиру в імпульсному гомогенізаторі молока, що дало змогу встановити ключові чинники та сили, які формують якість гомогенізації, а також забезпечує можливість керування цим процесом у виробничих умовах. Окреслено послідовність розроблення програми експериментальних досліджень – від вибору змінних параметрів до визначення їх оптимальних значень та виявлення залежностей між ними й показниками якості та енергоефективності роботи гомогенізатора. Експериментально встановлено, що середній діаметр жирових кульок після обробки в імпульсному гомогенізаторі становить 0,8 мкм, що повністю відповідає сучасним вимогам.

ДИСПЕРГУВАННЯ, ЯКІСТЬ, ІМПУЛЬСНИЙ ГОМОГЕНІЗАТОР,
МОЛОЧНИЙ ЖИР, СТУПІНЬ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ, ЕФЕКТИВНІСТЬ,
ЕНЕРГОЄМНІСТЬ, НОМОГРАМА.

ВСТУП

Процес диспергування полягає в тонкому подрібненні або рівномірному розподілі однієї речовини (дисперсної фази) у навколишньому дисперсійному середовищі, що забезпечує утворення однорідної дисперсної системи – емульсії чи суспензії. Такий процес широко застосовується в хімічній, фармацевтичній, харчовій і косметичній галузях, а також у сільському господарстві. У харчовій промисловості диспергування використовують під час виготовлення соусів, майонезу, маргарину, шоколадних напоїв, фруктових пюре та інших продуктів. Водночас наймасштабніше цей процес застосовується в молочній промисловості – при переробці молока та виробництві різноманітної молочної продукції.

Диспергування забезпечує підвищення стабільності й однорідності готового продукту, покращення його смакових характеристик та засвоюваності молочного жиру. Для реалізації цього процесу на молокопереробних підприємствах застосовують спеціальне технологічне обладнання – гомогенізатори. На сьогодні найбільш поширеними є апарати клапанного типу, які гарантують високу якість продукту та відзначаються простотою експлуатації. Проте такі гомогенізатори мають і низку суттєвих недоліків: високу вартість, значні габарити та, головне, значну енергоємність процесу, що в сучасних умовах є критичною проблемою. Це й зумовлює актуальність дослідження процесу диспергування молочного жиру під час гомогенізації з метою пошуку нових, більш ефективних типів обладнання, які забезпечать високу якість кінцевої продукції та водночас потребуватимуть менших енергетичних витрат порівняно з традиційними клапанними установками. Аналіз літературних джерел показав, що для диспергування емульсій (гомогенізації) наразі використовуються такі типи гомогенізаторів: клапанні, гвинтові, фільтерні, відцентрові, вакуумні, ультразвукові, вихрові, роторні, однак найбільшого розповсюдження набули клапанні гомогенізатори. Але останній тип обладнання, який дозволяє отримати високу якість диспергування емульсій, характеризується універсальністю та високою продуктивністю, має суттєві недоліки. Для створення достатнього тиску гомогенізації витрачається в середньому 7–8 кВт·год/т прероблюваної продукції, що є дуже високим показником. Другі за розповсюдженістю – роторні та вакуумні гомогенізатори не дозволяють отримати середній діаметр емульсії менше ніж 2,0 мкм, що є неприйнятним для багатьох видів продукції. Інші види гомогенізаторів, такі як, ультразвукові, гвинтові, філ'єрні, відцентрові та вихрові мають значно нижчі витрати енергії на процес, однак не дозволяють отримати високу ступінь диспергування. Таким чином сучасні гомогенізатори мають дві проблеми: або надвисокі енерговитрати, або низьку якість (ступінь) гомогенізації.

Проведений аналіз літературних джерел дає підстави стверджувати, що на сьогодні не існує єдиної, чітко сформованої теорії диспергування в процесі гомогенізації. Це пов'язано з тим, що жирові кульки молока мають надзвичайно малий розмір і високу швидкість руху, що фактично унеможлиблює детальне спостереження за перебігом процесу. Разом із тим

огляд досліджень дозволив виокремити перспективний тип обладнання, який під час дослідження автором продемонстрував високі показники за якістю продукту та енерговитратами – імпульсний гомогенізатор. Встановлено, що цей тип апаратів забезпечує середній діаметр жирових кульок після обробки менше 1 мкм, як і клапанні гомогенізатори, проте енерговитрати на процес становлять лише 0,82 Дж/кг, що значно нижче порівняно з обладнанням клапанного типу. Це обґрунтовує доцільність подальшого дослідження пульсаційного гомогенізатора з метою більш глибокого визначення ефективності процесу диспергування молочного жиру.

Методи і програма досліджень

Поставлені завдання виконувалися із застосуванням теоретичного інструментарію, що включав класичні гідродинамічні залежності, комп'ютерне моделювання в програмі Autodesk 3ds Max та використання універсальної системи кінцево-елементного аналізу Ansys Workbench.

Отримані експериментальні дані опрацьовували методами математичної статистики із залученням персонального комп'ютера, використовуючи табличний процесор Microsoft Excel та програмне середовище Mathcad.

Дослідження виконували в лабораторних умовах із застосуванням традиційних методик та авторських удосконалених підходів.

Програмою досліджень передбачено:

- проведення аналізу конструктивного рішення та принципу роботи імпульсного гомогенізатора;
- визначення основних чинників та факторів, які впливають на ефективність гомогенізації;
- проведення експериментальних досліджень ефективності використання імпульсного гомогенізатора молока в технологічній лінії переробки молока.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Попередні теоретичні дослідження засвідчили, що імпульсний гомогенізатор має містити резервуари для подавання молока в гомогенізатор та для зберігання вже обробленого продукту, нагнітальний насос для переміщення сировини, вентиль і прозору циліндричну робочу камеру, у якій розташований ударний механізм із наскрізними отворами. Поршень повинен виконувати зворотно-поступальні рухи за допомогою привідного вузла, що складається з електродвигуна зі змінюваною частотою обертання валу та кривошипного механізму з регульованим радіусом кривошипа. На основі отриманих даних було побудовано схему імпульсного гомогенізатора, подану на рис. 1. Устаткування складається з резервуарів для подавання молочної сировини до гомогенізатора 1 та для зберігання вже обробленого

продукту 7, насоса 2 для переміщення молока, клапана 3 і циліндричної прозорої камери 4, у якій здійснюється гомогенізація та розміщено ударний робочий елемент 5 із наскрізними щілинними отворами. Робочий ударний механізм здійснює коливальні рухи завдяки приводу 8, що містить електродвигун 10 з електронним регулятором частоти обертання та кривошипний механізм 9 із можливістю зміни радіуса кривошипа.

Принцип роботи установки є таким: у резервуар 1 завантажували незбиране молоко, попередньо нагріте до необхідної температури. Насос 2 подавав його до гомогенізаційної камери 4 крізь регулювальний вентиль 3, який відповідає за контроль подачі. Під дією зворотно-поступальних коливань поршня 5 здійснювалося подрібнення жирових кульок у молоці. Після завершення обробки отриманий гомогенізований продукт переміщувався до ємності 7.

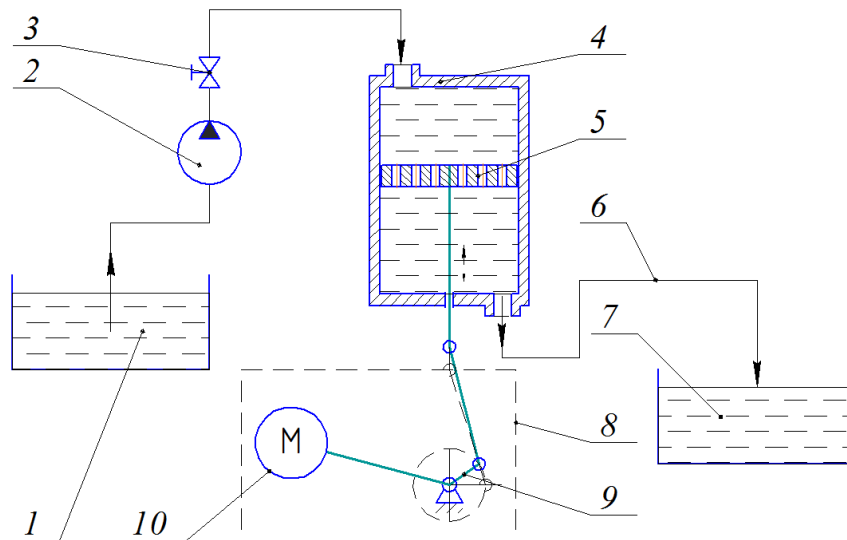


Рис. 1. Схематичне зображення лабораторної установки, призначеної для дослідження роботи імпульсного гомогенізатора: 1, 7 – резервуари для подавання та відбору молока відповідно; 2 – насосний агрегат; 3 – запірний вентиль; 4 – камера, у якій здійснюється процес гомогенізації; 5 – поршневий робочий механізм; 6 – трубопроводна система; 8 – привід, що забезпечує рух основного робочого вузла; 9 – кривошипний механізм із системою регулювання амплітуди; 10 – електродвигун, оснащений електронним регулятором частоти обертання валу.

Ключовими регульованими параметрами роботи пристрою є інтенсивність руху ударного поршня, зокрема частота та амплітуда його коливань. Саме ці величини формують гідродинамічні умови в зоні диспергування – швидкість і тиск емульсії – та визначають рівень якості гомогенізації.

Імпульсний гомогенізатор дозволяє створити умови, в яких виникає

значний знакозмінний (пульсуючий) градієнт швидкості проходження потоку продукту, що дозволяє отримати високу якість диспергування емульсії. Зниження енерговитрат у такому типі гомогенізатора реалізується за рахунок уникнення застійних зон та об'ємів емульсії з недостатньою дисипацією енергії.

Оцінювання ефективності роботи імпульсного гомогенізатора здійснювали на прикладі молока, де жирові кульки виступають дисперсною фазою емульсії, а молочна плазма – дисперсійним середовищем. Однак отримані результати можуть бути застосовані й до інших дрібнодисперсних емульсій.

Для аналізу та визначення швидкості руху потоку молока в імпульсному гомогенізаторі застосовували комп'ютерне моделювання за допомогою програмного комплексу для гідродинамічного аналізу Ansys Workbench та його модуля CFX, який забезпечує точні й надійні розрахунки процесів руху рідин і газів.

Під час моделювання були отримані профілі розподілу тиску, швидкостей та ліній течії вздовж робочої камери з урахуванням зміни параметрів, що впливають на процес імпульсної гомогенізації (рис. 2).

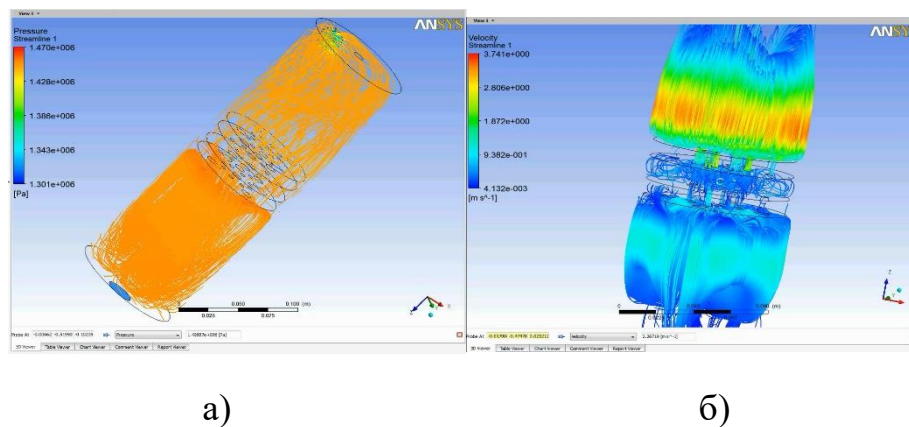


Рис. 2. Об'ємні 3D-візуалізації, отримані в Ansys Workbench: а) поле розподілу тиску; б) поле розподілу швидкостей у внутрішньому просторі робочої камери.

Результати аналітичних розрахунків показали, що для забезпечення високого ступеня гомогенізації ($N_{tm} = 4...5$) в імпульсному гомогенізаторі необхідно дотримуватися певних режимних параметрів: амплітуда руху поршня-ударника має бути 10–12 мм, частота його коливань – 55–65 Гц, а витрата молока повинна становити 1800–2000 кг/год.

Для підтвердження аналітичних результатів було виконано експериментальні дослідження процесу імпульсної гомогенізації з метою визначення ступеня диспергування молочного жиру. Отримані показники порівнювали з результатами, отриманими під час гомогенізації в клапанному апараті.

Для опрацювання результатів експерименту застосовували номограмний метод, який дає змогу одночасно оцінити вплив усіх незалежних змінних факторів на оптимізаційні параметри, що входять до

рівняння регресії. Такий підхід дозволяє встановити, яким чином ці фактори впливають на реальний перебіг технологічного процесу.

За допомогою програмного середовища Mathcad було сформовано номограму (рис. 3), яка використовувалася як інструмент для аналізу та добору оптимальних значень факторів, що забезпечують ступінь диспергування молочного жиру в імпульсному гомогенізаторі на рівні не нижче 4.

На підставі проведених досліджень встановлено, що для результативної роботи імпульсного гомогенізатора за продуктивності подачі молока 1800–2000 кг/год і досягнення ступеня гомогенізації на рівні 5 необхідно забезпечити такі технологічні режими: амплітуда коливань має становити 10–13 мм, а частота – перебувати в межах 53–62 Гц.

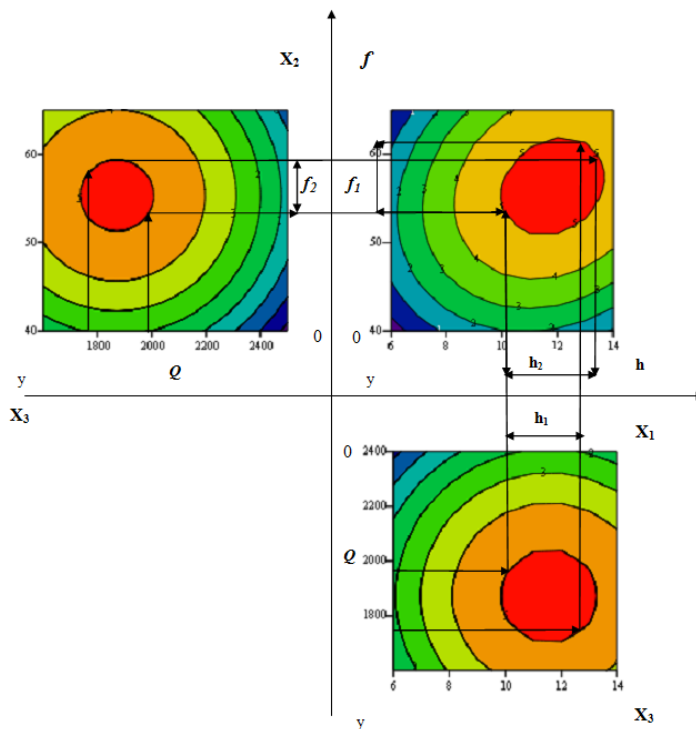


Рис. 3. Номограма для визначення та оцінювання оптимальних режимних параметрів, які забезпечують ступінь гомогенізації молока в імпульсному гомогенізаторі на рівні не нижче 4.

Розбіжність між теоретичними та експериментальними даними в усьому досліджуваному діапазоні параметрів не перевищує 11%, що підтверджує їхню надійність та відповідність.

Експериментально було встановлено також питому енергоємність процесу гомогенізації молока в імпульсному гомогенізаторі, результати якої подано на номограмі (рис. 4).

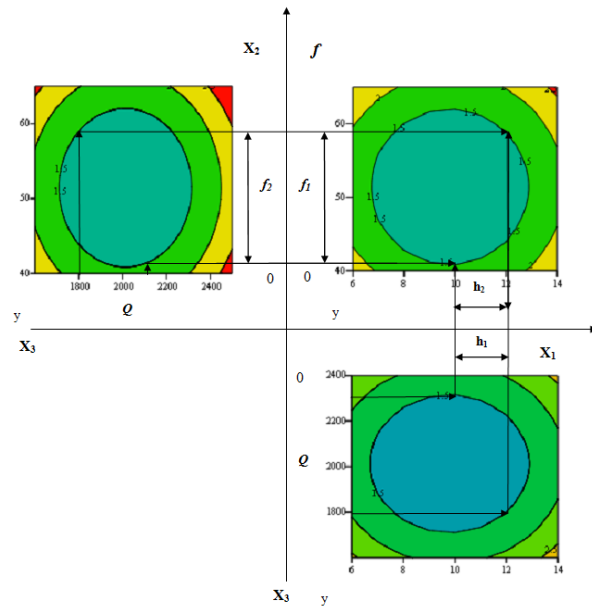


Рис. 5. Графічна номограма, що використовується для визначення оптимальних режимних параметрів, які забезпечують зниження енерговитрат під час імпульсної гомогенізації.

У результаті проведеного аналізу визначено, що за умови роботи імпульсного гомогенізатора при витраті молока 1800–2250 кг/год, амплітуді руху поршня-ударника 10–12 мм і частоті його коливань 43–59 Гц, споживана потужність у процесі гомогенізації становить 1,5 кВт, а питомі енерговитрати – 0,83 Дж/кг.

На основі узагальнення оптимальних параметрів із двох номограм встановлено, що для досягнення максимального ступеня гомогенізації ($H_m = 5$) за мінімальних питомих енерговитрат ($E_{\text{пит}} = 0,83$ Дж/кг) необхідно забезпечити такі режими роботи: амплітуда руху поршня-ударника – 10–12 мм, частота коливань – 55–59 Гц, витрата молока – 1800–2000 кг/год.

Різниця між теоретичними розрахунками та експериментальними результатами не виходить за межі 9% у всьому діапазоні параметрів, що підтверджує надійність і точність отриманих даних.

На рис. 5 наведено диференційні розподіли діаметрів жирових частинок, отриманих після диспергування в імпульсному гомогенізаторі та, відповідно, у клапанному гомогенізаторі.

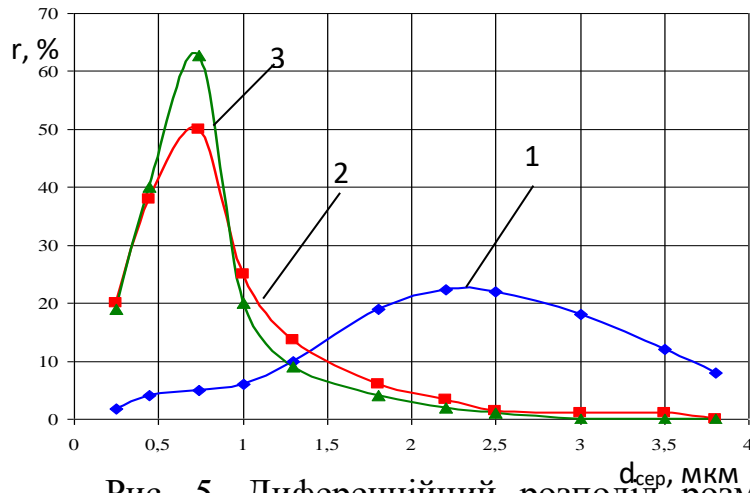


Рис. 5. Диференційний розподіл розмірів жирових частинок: 1 – молоко без обробки; 2 – дисперговане у клапанному гомогенізаторі (тиск 16 МПа, температура 65 °С); 3 – дисперговане в імпульсному гомогенізаторі (тиск 1,5 МПа, температура 65 °С).

Отримані дані свідчать, що середній діаметр жирових частинок у молочній емульсії є меншим при застосуванні імпульсної гомогенізації ($d_{av} = 0,80$ мкм проти $0,98$ мкм). Це означає, що якість гомогенізації в дослідному гомогенізаторі є на 19 % вищою порівняно з результатами, наведеними в роботі [19]. Водночас рівномірність фракційного складу після обробки у дослідному апараті не поступається еталонному клапанному гомогенізатору.

ВИСНОВКИ

У технологічному процесі переробки молока та виготовлення молочних продуктів гомогенізація є одним із ключових етапів, оскільки ступінь диспергування визначає смакові й сенсорні властивості кінцевої продукції. На підприємствах харчової галузі традиційно використовуються клапанні гомогенізатори, проте в сучасних умовах їх експлуатація є малоефективною та дорогою, адже такі апарати характеризуються значним споживанням електроенергії. Проведений аналітичний огляд дав змогу виокремити перспективний тип обладнання – імпульсний гомогенізатор, який істотно зменшує енергетичні витрати на процес гомогенізації без погіршення якості одержаного продукту. Було виконано дослідження, що дало можливість визначити й розрахувати основні параметри процесу диспергування в імпульсному гомогенізаторі.

Експериментальні результати показали, що для отримання максимального ступеня гомогенізації ($Nm = 5$) за мінімальних питомих

витрат електроенергії ($E_{\text{пит}} = 0,83 \text{ Дж/кг}$) необхідно дотримуватися таких режимів роботи: амплітуда коливань ударного поршня повинна становити 10–12 мм, частота – 55–59 Гц, а подача молока через імпульсний гомогенізатор має бути в межах 1800–2000 кг/год. Це підтверджує доцільність та високу ефективність застосування імпульсного гомогенізатора в технологічних лініях переробки молочної продукції.

Додатково встановлено, що середній розмір жирових кульок у молоці після обробки становить 0,80 мкм. При цьому однорідність фракційного складу після гомогенізації у дослідному апараті не поступається еталонному клапанному гомогенізатору. Тож, досліджуваний тип гомогенізатора доцільно використовувати в технологічній лінії виробництва питного молока.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Самойчук К. О., Паляничка Н. О., Верхоланцева В. О. Дослідження вискоефективного обладнання для гомогенізації дрібнодисперсних емульсій з використанням комп'ютерного моделювання // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету : наукове фахове видання / ТДАТУ: гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев.- Мелітополь: ТДАТУ, 2021. – Вип. 21, т. 1.- с. 84-92.

2. Самойчук К.О., Кюрчев С.В., Паляничка Н.О., Верхоланцева В.О. Впровадження вискоефективного обладнання для диспергування емульсій в технологічну лінію переробки молока. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету : електронне наукове фахове видання. 2022. Вип. 12. том 2.

3. Паляничка Н.О., Верхоланцева В.О., Червоткіна О.О., Ковальов О.О. Обґрунтування розробки лабораторної установки імпульсного гомогенізатора. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету : електронне наукове фахове видання. 2022. Вип. 13. том 1 (14).

4. Palianychka N., Samoichuk K., Verkholtantseva V., Sova N., Kholobtseva I. Quality Improvement of Emulsions Dispersion in the Pulsation Homogenizer Using Computer Simulation. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2025. 735 - 745.

5. Kyrylo Samoichuk, Valentyna Verkholtantseva, Nadiia Palianychka, Alexandr Kovalyov, Dmytro Dmytrevskiy, Dmytro Horielkov, Vitalii Chervonyi, Voitsekhivskiy Volodymyr (2024) Analysis of the hypotheses of milk fat phase dispersion and structural features of homogenizers. Food Technology Progressive Solutions, pp. 47–92.

6. Паляничка Н.О., Червоткіна О.О., Ковальов О.О., Ялпачик В.Ф. Дослідження ефективності диспергування молочного жиру в гомогенізаторі пульсаційного типу. Науковий вісник Таврійського державного

агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання. Запоріжжя: ТДАТУ, 2025. 15(1), 97-104.

7. Кюрчев С. В., Самойчук К. О., Ковальов О. О., Паляничка Н. О., В'юник О. В. Підвищення енергоефективності диспергування в пульсаційному гомогенізаторі рідких продуктів. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. Запоріжжя: ТДАТУ, 2024. Випуск 24, том 3. С. 7-17.

8. Самойчук К. О., Паляничка Н. О., Верхованцева В. О. Дослідження вискоефективного обладнання для гомогенізації дрібнодисперсних емульсій з використанням комп'ютерного моделювання // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету : наукове фахове видання / ТДАТУ: гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев.- Мелітополь: ТДАТУ, 2021. – Вип. 21, т. 1.- с. 84-92.

9. Кюрчев С. В., Самойчук К. О., Ломейко О. П. Розробка технології виробництва питного молока із застосуванням струминного та пульсаційного гомогенізаторів "Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. Запоріжжя: ТДАТУ, 2024. Том 14 № 2. 10. <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2024-24-2-10>

10. Кюрчев С. В., Самойчук К. О., Ковальов О. О., Паляничка Н. О., В'юник О. В. Підвищення енергоефективності диспергування в пульсаційному гомогенізаторі рідких продуктів. Праці ТДАТУ, Вип. 24. Т.3. 2024. С. 7-17. DOI: 10.32782/2078-0877-2024-24-3-1

11. 262. Кюрчев С. В., Самойчук К. О., Ломейко О. П. Визначення параметрів струминного та пульсаційного гомогенізаторів молока при їх промислового застосуванні. Праці ТДАТУ, Вип. 24. Т.1. 2024. С. 53-62. DOI: 10.32782/2078-0877-2024-24-1-3

12. Кюрчев С. В., Самойчук К. О., Ломейко О. П. Методика розробки експериментального зразка пульсаційного гомогенізатора молока. Науковий вісник ТДАТУ. Вип. 13. Т.2. 2. DOI: 10.31388/2220-8674-2023-2 -2.

РОЗДІЛ 9

РОЗРОБКА СТРУМИННО-ЩІЛИННОГО ГОМОГЕНІЗАТОРА МОЛОКА

РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження є процес струминно-щілинної гомогенізації молока з роздільною подачею вершків.

Предметом дослідження є закономірності впливу технологічних, конструктивних та гідравлічних параметрів струминно-щілинного гомогенізатора на якісні та енергетичні показники процесу.

Метою дослідження є зниження енергетичних витрат при забезпеченні високої якості гомогенізації молока шляхом обґрунтування конструктивно-технологічних та гідравлічних параметрів гомогенізатора, а також дослідження можливостей підвищення його продуктивності.

Методи досліджень. Використовувались теоретичні інструменти: класична гідродинаміка, теорія граничного шару Шліхтінга, теорія затоплених струменів, локальна ізотропна турбулентність Колмогорова–Обухова.

Застосовувалось комп'ютерне моделювання процесу в програмному комплексі ANSYS Workbench із попереднім створенням геометричної моделі камери у SolidWorks.

Виконувались аналітичні та експериментальні дослідження для визначення реальних показників дисперсності та енергоефективності гомогенізованого молока.

Основні результати досліджень: Встановлено, що для забезпечення найменшого середнього діаметра жирових кульок раціональною є конічна форма внутрішніх поверхонь конфузору, тоді як для зниження енерговитрат доцільно застосовувати коноїдальний профіль.

Оптимізація форми внутрішніх поверхонь кільцевої щілини показала, що підвищення енергоефективності можливе при виготовленні торцевих поверхонь між конфузором та дифузором коноїдальної форми.

Встановлено, що для ефективного руйнування жирових кульок швидкість подачі вершків має бути у 5–8 разів меншою за швидкість потоку знежиреного молока.

Раціональний діаметр конфузору в місці найбільшого звуження становить 3–4 мм.

Оптимальна ширина кільцевої щілини складає близько 0,8 мм, а експериментально підтверджено ефективність роботи у діапазоні 0,5–0,9 мм.

Раціональна швидкість подачі вершків становить близько 10 м/с, що добре корелює з результатами аналітичних досліджень.

Забезпечено можливість зниження питомих енерговитрат диспергування до 0,95–0,97 кВт·год/т при отриманні продукту з середнім діаметром жирових кульок на рівні клапанних гомогенізаторів (0,80–0,85 мкм).

Ключові слова: струминно-щілинний гомогенізатор, кільцева щілина, конфузур, вершки, середній діаметр жирових кульок, енергоефективність, диспергування, продуктивність.

ВСТУП

Одним із найактуальніших завдань молокопереробної промисловості є підвищення енергоефективності процесу диспергування жирової фази молочної емульсії. Необхідність проведення цього процесу пояснюється тим, що необроблене молоко містить жирові кульки діаметром 3–4 мкм, які відповідно до закону Стокса швидко спливають, утворюючи шар вершків. Без гомогенізації споживач отримує розшаровану емульсію зі зниженими смаковими та харчовими властивостями.

Незважаючи на тривалий досвід використання гомогенізації для поліпшення якості молочних продуктів, найбільш поширені у промисловості клапанні гомогенізатори характеризуються високими енерговитратами – понад 7–8 кВт·год/т, що наближається до енерговитрат процесу подрібнення зерна. Це створює серйозні економічні проблеми для підприємств України, де витрати енергоресурсів у структурі собівартості продукції значно перевищують показники розвинених країн. В умовах інтеграції до європейського економічного простору та реалізації принципів «European Green Deal» питання енергоефективності стає критично важливим для виживання та конкурентоспроможності галузі.

Метою гомогенізації є отримання стабільної емульсії полідисперсної системи, якою є молоко. Це досягається шляхом зменшення середнього діаметра часток жирової фази (СДЧЖФ), що забезпечує стійкість продукту до розшарування, покращує органолептичні характеристики та знижує втрати молочного жиру. Аналіз показує, що клапанні гомогенізатори забезпечують СДЧЖФ на рівні 0,75–0,80 мкм, проте їх енергоємність залишається надмірною.

Відсутність єдиної теорії диспергування пояснюється мікроскопічними розмірами жирових кульок та високими швидкостями руху молока. Існуючі конструкції гомогенізаторів або мають високі енерговитрати (клапанні,

мікрофлюїдизатори), або не забезпечують необхідної якості продукту (вібраційні, електрогідравлічні, вакуумні). Розвиток теоретичних основ дозволив висунути нову гіпотезу: суттєве зниження енерговитрат можливе за рахунок створення максимальної різниці швидкостей між потоками знежиреного молока та вершків.

Цей принцип реалізується у струминних гомогенізаторах молока. Відомі конструкції (міні-міксери, кавітаційні диспергатори, мікрофлюїдизатори, ударно-струминні та протитечійно-струминні апарати) забезпечують різний рівень дисперсності та енергоефективності, проте мають низку недоліків – низьку продуктивність, значне піноутворення, швидку облітерацію каналів. Найвищі показники енергоефективності продемонстрував струминний гомогенізатор з роздільною подачею вершків, який забезпечує СДЧЖФ 0,80–0,90 мкм при питомих витратах енергії до 0,90 кВт·год/т.

З метою усунення недоліків існуючих конструкцій та підвищення енергоефективності процесу дослідниками ТДАТУ було розроблено струминно-щілинний гомогенізатор молока (СГМЩТ). Його конструктивні особливості дозволяють створити максимальну швидкість ковзання жирових кульок відносно молочної плазми, забезпечити роздільну подачу вершків та поєднати процеси нормалізації й гомогенізації в одному циклі. Результати досліджень свідчать, що після обробки в СГМЩТ середній діаметр жирових кульок становить 0,80–0,85 мкм при питомих енерговитратах до 0,85 кВт·год/т.

Таким чином, робота з обґрунтування параметрів струминно-щілинного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків є актуальною та має важливе значення для підвищення енергоефективності молокопереробної галузі України.

ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Поставлені задачі вирішувались із застосуванням теоретичного інструментарію, що включав:

- залежності класичної гідродинаміки;
- теорію затоплених струменів;
- теорію граничного шару Шліхтінга;
- положення локальної ізотропної турбулентності Колмогорова–Обухова;

комп'ютерне моделювання процесу в програмному комплексі кінцево-елементного аналізу ANSYS Workbench з попереднім створенням геометричної моделі камери у SolidWorks.

Отримані аналітичні залежності підтвердили наявність зв'язку між формою внутрішніх поверхонь кільцевої щілини та якістю й енерговитратами процесу гомогенізації.

Мета досліджень – обґрунтування оптимальної форми профілю внутрішніх поверхонь конфузору та кільцевої щілини струминно-щілинного гомогенізатора молока для зниження енергетичних витрат диспергування та підвищення продуктивності обладнання при забезпеченні високої якості готового продукту.

Програмою досліджень передбачено:

Встановлення впливу форми профілю внутрішніх поверхонь конфузору на середній діаметр жирових кульок після диспергування.

Визначення впливу форми профілю внутрішніх поверхонь конфузору на енергетичні витрати процесу гомогенізації.

Оптимізація форми профілю внутрішніх поверхонь конфузору в місці найбільшого звуження.

Оптимізація форми внутрішніх поверхонь профілю між конфузором та дифузором.

Обґрунтування параметрів кільцевої щілини для забезпечення подальшого підвищення енергоефективності СГМЦТ.

Проведення аналітичних досліджень із комп'ютерним моделюванням для встановлення раціональних параметрів кільцевої щілини.

Виконання експериментальних досліджень струминного диспергатора для визначення реальних показників дисперсності гомогенізованого молока.

Таким чином, програма досліджень поєднує аналітичне моделювання та експериментальні випробування, що дозволяє комплексно обґрунтувати конструктивні параметри струминно-щілинного гомогенізатора молока та забезпечити його високу енергоефективність.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Основою адекватної оцінки параметрів струминно-щілинного гомогенізатора молока при проведенні аналітичних досліджень є вибір методів, використання яких дозволить мати уявлення відносно середніх значень основних факторів диспергування в СГМЦТ. Одним з методів, використання яких дозволяє скоротити обсяг проведення досліджень, забезпечити отримання даних, які відрізняються достовірністю та повнотою є

моделювання процесу. Відомо багато програмних розробок, які використовуються для моделювання гідродинамічних параметрів процесів в харчовій промисловості (Solid Works, COSMOS, AutoCAD). Авторами було обрано програмний комплекс кінцево-елементного аналізу ANSYS. Це обумовлено тим, що використання цього програмного модулю дає змогу оперувати великою кількістю параметрів процесу, забезпечує високу точність результатів, та тим, що сталі фактори (в'язкість та густина вершків та знежиреного молока) в ньому наближені до реальних значень. До початку моделювання авторами було створено в програмному комплексі Solid Works геометрично параметризовану модель кільцевої щілини СГМЩТ, потоку знежиреного молока та струменів вершків. Потім цю модель було інтегровано до програмного модулю ANSYS. При проведенні досліджень в якості змінних факторів, які обумовлюють енергоефективність гомогенізатора було виділено ширина кільцевої щілини h .

Ширина кільцевої щілини СГМЩТ має знаходитись в межах 0,4–1,2 мм. Нижня межа параметру обумовлена умовою забезпечення продуктивності лабораторного зразку, що має наближуватись до показників промислових гомогенізаторів молока. Верхня межа діапазону обумовлена розсіюванням дисипації потужності потоку, що спостерігається при збільшенні ширини кільцевої щілини та призводить до збільшення ЧЖФ при диспергуванні.

При проведенні експериментальних досліджень використовувалось коров'яче молоко, за вимогами ISO 9622: 2013 (Milk and liquid milk products). Методика проведення експериментальних досліджень описана в працях.

Експериментальні дослідження проводились на лабораторному зразку струминного гомогенізатора молока щілинного типу, розробленого на базі ТДАТУ (Україна) (рис.1).

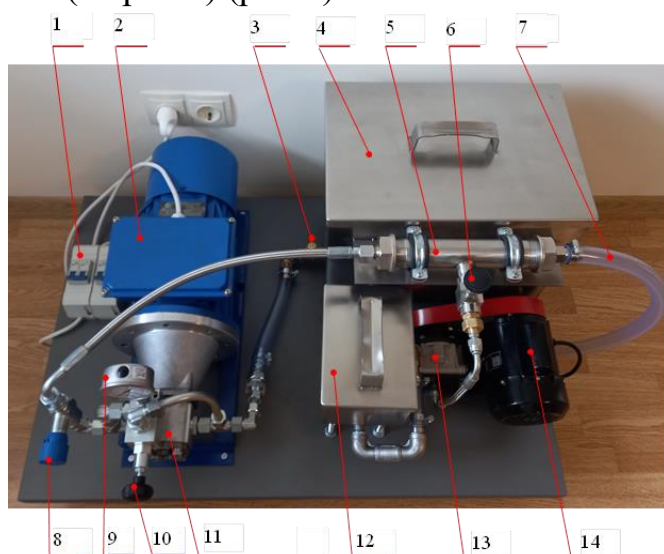


Рис. 1. Струминний гомогенізатор молока щілинного типу (СГМЩТ): 1 – пакетні вимикачі ; 2 – двигун подачі дисперсійної фази; 3– вентиль подачі дисперсійної фази; 4 – ємність з дисперсійною фазою; 5 – гомогенізуючий вузол СГМЩТ; 6 – вентиль регулювання подачі дисперсної фази; 7 – трубопровід зливу гомогенізованого та нормалізованого молока; 8 – редукційний клапан; 9 – манометр; 10 – вентиль регулювання подачі дисперсійної фази; 11 – насос подачі дисперсійної фази; 12 – ємність для дисперсної фази; 13 – насос подачі дисперсної фази; 14 – електродвигун приводу насосу подачі дисперсної фази.

При включенні пакетного вимикача 1 за допомогою двигуну 2 та насосу 11, шляхом перекриття перетину вентилів 3 та 10 та використання клапану 8 забезпечується подача швидкісного потоку дисперсійної фази з ємності 4. Під високим тиском, що контролюється за допомогою манометру 9 дисперсійна фаза прямує до центральної частини гомогенізуючого вузлу 5, яка являє собою місце найбільшого звуження перетину. В цій зоні, яка утворює кільцеву щілину між торцевими поверхнями конфузору та дифузору до потоку дисперсійної фази з ємності 12 за допомогою двигуна 14 та насосу 13 при регулюванні за допомогою вентиля 6 подається визначена кількість дисперсної фази (нормалізація). Необхідна швидкість ковзання ЧЖФ, з яких складається дисперсна фаза відносно молочної плазми дисперсійного середовища, обумовлює досягнення необхідних значень критерію Вебера, що обумовлює диспергування молочного жиру (гомогенізація). Гомогенізоване молоко відводиться за допомогою трубопроводу 7.

Серед параметрів кільцевої щілини, які чинять вплив на якість диспергування та енергетичні витрати процесу були виділені: жирність вершків, швидкість їх подачі, ширина кільцевої щілини. Швидкість дисперсної фази при входженні у струмінь знежиреного молока визначимо як.

$$v_g = \frac{Q_g}{S_g} = \frac{Q_g}{\pi d h}, \quad (1)$$

де Q_v – подача вершків, кг/год;

v_v – швидкість подачі вершків, м/с;

S_v – площа перетину камери струминного гомогенізатора молока щілинного типу в місці найбільшого звуження конфузору, м²;

d_k – внутрішній діаметр камери щілинного гомогенізатора в місці найбільшого звуження, м;

h – внутрішній діаметр камери щілинного гомогенізатора в місці найбільшого звуження, м.

Конструкція СГМЩТ передбачає можливість здійснення нормалізації молока за жирністю, що досягається регулюванням співвідношення подачі знежиреного молока та вершків. В разі використання нормалізації подачі вершків та знежиреного молока пов'язані з необхідною жирністю гомогенізованого продукту співвідношенням

$$\frac{Q_z}{J_g - J_{zn}} = \frac{Q_b}{J_{н.м} - J_{zn}} = \frac{Q_{zn}}{J_g - J_{н.м}}, \quad (2)$$

де J_b , $J_{н.м}$, J_{zn} – жирність відповідно вершків, нормалізованого та знежиреного молока %;

$Q_{н.м}$, Q_{zn} – подача відповідно нормалізованого та знежиреного молока кг/год.

Тоді подачу СГМЩТ можна виразити через подачу знежиреного молока

$$Q_z = Q_{zn} \left(\frac{J_g - J_{zn}}{J_g - J_{н.м}} \right), \quad (3)$$

або через подачу вершків

$$Q_z = Q_b \left(\frac{J_g - J_{zn}}{J_{н.м} - J_{zn}} \right). \quad (4)$$

Після перетворень отримаємо вираз, який пов'язує параметри СГМЩТ

$$\pi d_k h v_g = v_{zn} \frac{\pi d_k^2 (J_{н.м} - J_{zn})}{4 (J_g - J_{н.м})}, \quad (5)$$

де v_{zn} – швидкість подачі знежиреного молока, м/с.

Аналіз формули (5) свідчить, що зменшуючи ширину щілини в місці подачі вершків слід збільшувати швидкість подачі жирової фази і (або) використовувати вершки більшої жирності. Для створення максимальної різниці швидкостей фаз, що є необхідною умовою диспергування, згідно результатів теоретичних розрахунків при діаметрі камери в місці найбільшого звуження, яка дорівнює 2–2,5 мм швидкість вершків при використанні вершків жирністю 10% має складати 12–16 м/с. При жирності вершків, що дорівнює 30% та діаметрі камери в місці найбільшого звуження, що знаходиться в межах вказаних вище значень, для досягнення технологічно заданого розміру ЧЖФ необхідно забезпечити швидкість руху вершків на рівні 4,5–5 м/с. Таким чином можна констатувати, що для забезпечення ефективного зменшення середнього розміру ЧЖФ швидкість

знежиреного молока має перевищувати швидкість подачі вершків у 5–8 разів. Вираз (5) рекомендується враховувати при підборі раціональних значень жирності вершків та ширини щілини для подачі вершків.

Знайдена залежність потужності, необхідної для приводу насосів подачі дисперсійної та дисперсної фази, яка має кінцевий вигляд

$$P = Q_{zn}^3 \left(\frac{8\rho_{zn}}{2\mu_k^2 \pi^2 d_k^4} + \left(\frac{Ж_{н.м} - Ж_{zn}}{Ж_г - Ж_{н.м}} \right)^2 \frac{\rho_g}{2\mu_g^2 h^2 \pi^2 d_k^2} \right), \quad (6)$$

де ρ_{zn} , ρ_v , – густини знежиреного молока та вершків, кг/м³;

μ_k , μ_v , – коефіцієнти витрат камери в місці найбільшого звуження та кільцевої щілини подачі вершків.

Аналіз формули (6) свідчить, що залежність потужності для приводу СГМЩТ від подачі знежиреного молока має гіперболічний характер, а потужність, необхідна для насосу подачі дисперсної фази залежить від діаметра камери в місці найбільшого звуження, жирності вершків і ширини щілини в місці найбільшого звуження. На енергетичні витрати диспергування впливає також коефіцієнт витрат, значення якого залежить від форми конфузору в місці найбільшого звуження. Тому при проведенні досліджень доцільно визначити раціональну форму камери з точки зору мінімізації питомих витрат енергії.

Питомі енерговитрати СГМЩТ, визначаються з формули

$$E_{пит} = \frac{Q_{zn} \cdot \Delta p_{zn} + Q_g \cdot \Delta p_g}{(Q_g + Q_{zn}) \cdot \rho_m}, \quad (7)$$

де ρ_m , – густина молока, кг/м³;

Δp_{zn} , Δp_v , – надлишкові тиски подачі дисперсійної та дисперсної фаз.

Звідси після перетворень отримуємо

$$E_{пит} = \frac{\Delta p_{zn} \left(8 \cdot \rho_{zn} + \frac{\mu_k^2 \cdot d_k^2 \cdot \rho_g}{2 \cdot h^2 \cdot \mu_g^2} \left(\frac{Ж_{н.м} - Ж_{zn}}{Ж_г - Ж_{н.м}} \right)^3 \right)}{8 \cdot \rho_{zn} \cdot \rho_m \cdot \left(\frac{Ж_г - Ж_{zn}}{Ж_г - Ж_{н.м}} \right)}. \quad (8)$$

З формули (8) з метою визначення раціональної форми камери гомогенізатора в місці найбільшого звуження було побудовано графік залежності питомих витрат енергії СГМЩТ від ширини кільцевої щілини (рис.2)

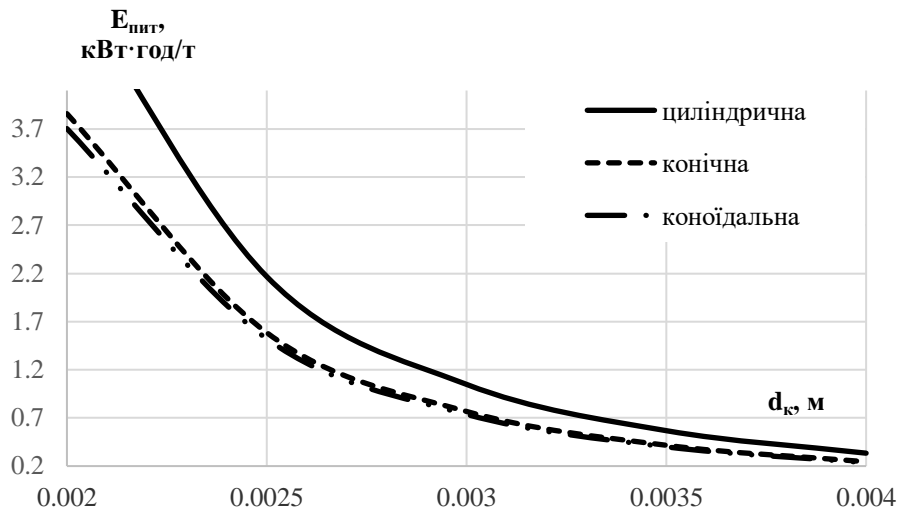


Рис. 2. Залежність питомих енерговитрат від діаметра конфузора в місці звуження і коефіцієнту витрат внутрішніх поверхонь конфузору для типових форм внутрішньої поверхні камери (при $Q_T=2000$ кг/год; $J_{\text{н.м}}=3,5\%$; $J_{\text{зн}}=0,05\%$; $J_{\text{в}}=40\%$; $h=0,6$ мм; $\mu_{\text{в}}=0,3$)

Аналіз залежності питомих енерговитрат СГМЦТ від діаметра конфузору в місці найбільшого звуження камери гомогенізації і форми камери (рис.2) свідчить що використання найменш доцільним з точки зору зниження енерговитрат диспергування є використання камери з циліндричною формою профілю внутрішніх поверхонь. Найбільш енергоефективним рішенням є використання камери з коноїдальною формою внутрішнього профілю. При цьому діаметр камери в місці найбільшого звуження має складати біля 3..4 мм.

Відповідно до результатів аналітичних досліджень, суттєвий вплив на потужність та питомі енерговитрати диспергування здійснює ширина кільцевої щілини, поля швидкості при різних значеннях якої наведено на (рис.3).

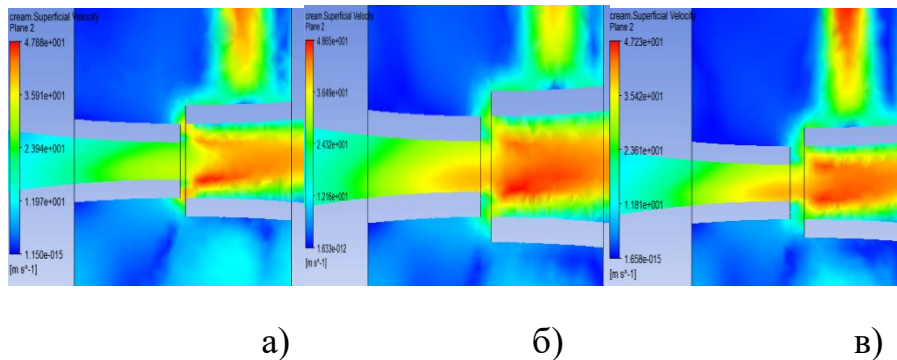


Рис. 3. Поля швидкостей при тиску подачі знежиреного молока $\Delta p_{\text{зн}}=8$ МПа та ширині кільцевої щілини h : а) $h=0,4$ мм; б) $h=0,8$ мм; в) $h=1,2$ мм

Аналіз даних (рис.3) дозволяє стверджувати, що при мінімальній величині кільцевої щілини створюється менша різниця швидкостей знежиреного молока та вершків. Це пов'язано з тим, що зона локалізації максимальної різниці швидкостей знежиреного молока та вершків охоплює лише центральну частину площі дифузору, що призводить до підвищення розмірів ЧЖФ та енерговитрат процесу []. При збільшенні ширини кільцевої щілини до $h=0,8\text{мм}$ створюються необхідні умови для якісного диспергування. Це пояснюється тим, що зона локалізації максимальної різниці швидкостей знежиреного молока та вершків займає більшу частину площі дифузору за кільцевою щілиною. При збільшенні h до $0,8\text{ мм}$ спостерігається зниження питомих енерговитрат процесу [].

Аналіз полів швидкостей, отриманих при проведенні моделювання для різних значень ширини кільцевої щілини ($0,4\text{--}1,2\text{ мм}$) та тиску подачі знежиреного молока $\Delta p_{\text{зн}}=8\text{ МПа}$ (рис.3) свідчить, що необхідні для диспергування умови створюються при $h=0,8\text{мм}$. Це пояснюється тим, що за вказаних параметрів зона локалізації максимальної різниці між швидкостями дисперсійної та дисперсної фаз охоплює більшу частину площі за кільцевою щілиною, тобто в місці руйнування жирових кульок молока [].

Були проведені експериментальні дослідження впливу швидкості подачі ширини кільцевої щілини на показники дисперсності ЧЖФ при різних значеннях швидкості подачі вершків (рис. 4) та порівняння отриманих даних з аналітичними.

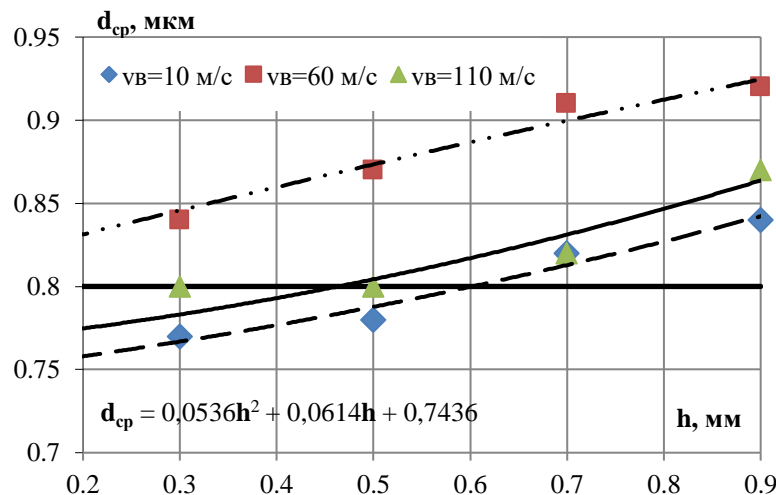


Рис. 4. Графік залежності середнього діаметра жирових кульок d_{cp} від ширини щілини камери гомогенізації в місці найбільшого звуження h і жирності вершків J_B , при $J_{н.м}=3,5\%$, $d_k=3\text{ мм}$, $v_{зн}=60\text{ м/с}$

Зменшення розміру ЧЖФ можливо досягти шляхом зменшення ширини кільцевої щілини h (рис. 4.3). При використанні щілини шириною $0,1\text{--}0,5\text{ мм}$ можливо отримати продукт ЧЖФ, якого складає $0,75\text{--}0,80\text{ мкм}$,

що знаходиться на рівні показників дисперсності клапанного гомогенізатора. При зменшенні ширини щілини до $h=0,1-0,5$ мм можливо отримати продукт з середнім розміром жирових кульок, який складає $0,74-0,81$ мкм, що знаходиться на рівні показників дисперсності клапанного гомогенізатора. Але, використання кільцевої щілини, ширина якої є меншою за $h=0,3$ мм згідно результатів аналітичних досліджень призводить до $1,5-2$ кратного зростання енергетичних витрат, порівняно з використанням гомогенізатору, ширина кільцевої щілини в якому коливається в межах $h=0,5-0,9$ мм.

При цьому близькі результати по дисперсності ЧЖФ отримуємо при швидкостях подачі вершків 10 м/с та 110 м/с, що пояснюється створенням при цих швидкостях максимальної різниці з швидкістю знежиреного молока, раціональне значення якої згідно результатів попередніх досліджень має складати $55-60$ м/с []. Але при швидкості 110 м/с енергетичні витрати розробленого гомогенізатора будуть суттєво зростати, наближуючись до енергетичних витрат клапанних диспергаторів. При швидкості вершків 60 м/с бачимо погіршення показників дисперсності, що пояснюється відсутністю різниці між швидкостями дисперсійної та дисперсної фаз. Отже раціональне значення швидкості подачі вершків складає 10 м/с, що в 6 разів менше за раціональне значення швидкості подачі знежиреного молока, обґрунтованого в праці []. Оптимальні значення ширини кільцевої щілини та жирності вершків дасть змогу отримати проведення експериментальних досліджень енергетичних витрат диспергування та проведення оптимізації процесу диспергування в СГМЦТ.

ВИСНОВКИ

За результатами проведених досліджень було визначено оптимальні конструктивні параметри струминно-щілинного гомогенізатора молока, які забезпечують ефективне руйнування жирових кульок при одночасному зниженні енерговитрат процесу.

Форма конфузору. Найменший середній діаметр жирових кульок досягається при використанні конфузору з конічним профілем внутрішніх поверхонь.

Для зниження енерговитрат диспергування раціонально застосовувати конфузори коноїдальної форми.

Оптимальний діаметр конфузору в місці найбільшого звуження становить $3-4$ мм.

Кільцева щілина. Найменше значення гідравлічного коефіцієнта витрат забезпечується при виготовленні внутрішніх торцевих поверхонь кільцевої щілини коноїдальної форми.

Моделювання показало, що раціональна ширина кільцевої щілини складає близько 0,8 мм, а експериментальні дослідження підтвердили ефективність роботи у діапазоні 0,5–0,9 мм.

Швидкість подачі продукту. Для забезпечення високої якості продукту швидкість подачі вершків має становити близько 10 м/с, що у 5–8 разів менше за швидкість потоку знежиреного молока.

Отримані результати добре корелюють із аналітичними дослідженнями та підтверджують раціональність вибраних режимів.

Енергоефективність. Оптимізація форми конфузору та параметрів кільцевої щілини дозволяє знизити питомі енерговитрати диспергування до 0,95–0,97 кВт·год/т, при цьому середній діаметр жирових кульок відповідає рівню клапанних гомогенізаторів.

Таким чином, розроблений струминно-щілинний гомогенізатор забезпечує отримання молочної емульсії високої якості при суттєвому зниженні енерговитрат, що підтверджує доцільність його подальшого вдосконалення та розробки методики розрахунку параметрів промислового зразка диспергатора.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Ковальов О. О. Обґрунтування параметрів струминно-щілинного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11. ТДАТУ. Мелітополь, 2021. -20 с.

2. Bratishko V, Kovalov O. Economical efficiency of using a dispergator jet-slot type. Проблеми та перспективи розвитку агропромислового комплексу України: матеріали II Всеукраїн. наук.-практ. Інтернет-конференції / ТДАТУ: ред. кол. С. В. Кюрчев, О.В. Пеньов, Е. К. Посвятенко [та ін.]. - Мелітополь: ТДАТУ, 2021. – 113– 115 с.

3. Самойчук К. О., Ковальов О. О. Шляхи підвищення якості диспергування в клапанних гомогенізаторах молока // Новації в технології та обладнанні готельно-ресторанних, харчових і переробних виробництв: друга міжнародна науково-практична інтернет-конференція, 23 листопада 2021 р. : [матеріали конференції] / під заг. ред. В.М. Кюрчева. – Мелітополь : ТДАТУ, 2021. С. 26-28.

4. Kiurchev S., Samoichuk K., Kovalyov O., Leshchij R. Method of calculation of an industrial model of jet-slot milk homogenizer. ТЕКА. Quarterly journal of agri-food industry. – 2020, Vol. 19, No. 4, p. 23–30.

5. Ковальов О. О. Обґрунтування параметрів струминно-щілинного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11. ТДАТУ. Мелітополь, 2021. -20 с.

6. Bratishko V, Kovalov O. Economical efficiency of using a dispergator jet-slot type. Проблеми та перспективи розвитку агропромислового комплексу України: матеріали II Всеукраїн. наук.-практ. Інтернет-конференції / ТДАТУ: ред. кол. С. В. Кюрчев, О.В. Пеньов, Е. К. Посвятенко [та ін.]. - Мелітополь: ТДАТУ, 2021. – 113– 115 с.

7. Самойчук К. О., Ковальов О. О. Шляхи підвищення якості диспергування в клапанних гомогенізаторах молока // Новації в технології та обладнанні готельно-ресторанних, харчових і переробних виробництв: друга міжнародна науково-практична інтернет-конференція, 23 листопада 2021 р. : [матеріали конференції] / під заг. ред. В.М. Кюрчева. – Мелітополь : ТДАТУ, 2021. С. 26-28.

8. Ковальов О. О., Самойчук К.О., Паляничка Н.О. Оцінка впливу турбулентних пульсацій та квазістатичного руйнування жирових кульок в струминному гомогенізаторі молока Інтеграційні та інноваційні напрями розвитку харчової індустрії: Матеріали шостої міжнародної науково-практичної конференції (3-4 листопада 2022 року). Черкаси: ЧДТУ, 2022. С. 100-103.

9. Ковальов О.О., Самойчук К.О., Паляничка Н.О. Зниження енергоємності при використанні роздільного способу диспергування молока. Сучасна інженерія агропромислових і харчових виробництв: Матеріали міжнародної науково-практичної конференції (24-25 листопада 2022 року). Харків: ДБТУ, 2022. С. 164-165.

10. Palianychka N, Samoichuk K, Kovalyov A. Application of computer simulation for researching the process of milk emulsion dispersion. Інтеграційні та інноваційні напрями розвитку харчової індустрії: Матеріали шостої міжнародної науково-практичної конференції (3-4 листопада 2022 року). Черкаси: ЧДТУ, 2022. С. 110-115.

11. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Перспективні шляхи підвищення енергоефективності диспергування. Сучасна інженерія агропромислових і харчових виробництв: Матеріали міжнародної науково-практичної конференції (24-25 листопада 2022 року). Харків: ДБТУ, 2022. С. 156-157.

12. Самойчук К.О., Ковальов О.О., Паляничка Н.О. Перспективний напрямок зниження енерговитрат диспергування. Матеріали IV Міжнародної

науково-практичної конференції «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі»(01-25 листопада 2022 р.), с.108-111.

13. Tkach V, Kovalov O. Principles of jet-slit homogenizer of milk with separate supply of cream. Проблеми та перспективи розвитку агропромислового комплексу України: матеріали II Всеукраїн. наук.-практ. Інтернет-конференції / ТДАТУ: ред. кол. С. В. Кюрчев, О.В. Пеншов, Е. К. Посвятенко [та ін.]. - Мелітополь: ТДАТУ, 2021. – 125– 127 с.

14. Ковальов О. О. Підвищення засвоюваності коров'ячого молока при годуванні дитини. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали III Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції (Мелітополь, 01-26 листопада 2021 р.) / ТДАТУ: ред. кол. В. М. Кюрчев, В. Т. Надикто, О. Г. Скляр [та ін.]. - Мелітополь: ТДАТУ, 2021. - 391-394 с.

15. Ковальов О. О., Самойчук К. О., Тарасенко В. Г. Процеси, які відбуваються в зоні граничного шару струминно – щілинного гомогенізатора молока // Новації в технології та обладнанні готельно-ресторанних, харчових і переробних виробництв: друга міжнародна науково-практична інтернет-конференція, 23 листопада 2021 р. : [матеріали конференції] / під заг. ред. В.М. Кюрчева. – Мелітополь : ТДАТУ, 2021. С. 48-51.

16. Самойчук К. О., Ломейко О. П., Ковальов О. О. Визначення розмірних критеріїв гомогенізації жирових кульок молока // Новації в технології та обладнанні готельно-ресторанних, харчових і переробних виробництв: друга міжнародна науково-практична інтернет-конференція, 23 листопада 2021 р. : [матеріали конференції] / під заг. ред. В.М. Кюрчева. – Мелітополь : ТДАТУ, 2021. С. 117-119.

17. Samoichuk, K.; Kovalyov, A.; Fuchadzhy, N.;Hutsol, T.; Jurczyk, M.; Rajak, T.; Banaś, M.; Bezalychna, O.; Shevtsova, A. Energy Costs Reduction for Dispersion Using a Jet-Slot Type Milk Homogenizer. *Energies* 2023, 16, 2211.

18. Ковальов О. О., Самойчук К. О., Фучаджи Н.О., Паляничка Н.О. Оцінка перспектив розвитку молочних автоматів і економічної ефективності їх оснащення гомогенізаторами. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання / ТДАТУ, 2022. – Вип. 12, том 3. (12)

19. Ковальов О.О. Самойчук К.О. Паляничка Н.О. Оптимізація форми внутрішніх поверхонь кільцевої щілини струминного гомогенізатора молока. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання /. Запоріжжя: ТДАТУ. – 2022. Вип. 12, том 4.

20. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Фучаджи Н.О. Методика розрахунку параметрів промислового зразка струминно-щілинного

гомогенізатора молока. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання/. Запоріжжя: ТДАТУ – 2022. Вип. 12, том 4.

21. Паляничка Н. О., Верхованцева В. О., Червоткіна О. О., Ковальов О. О. Обґрунтування розробки лабораторної установки імпульсного гомогенізатора Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. – Мелітополь: ТДАТУ, 2023.

22. Кюрчев С. В., Самойчук К. О., Ломейко О. П. Методика розрахунку експериментального зразка струминного гомогенізатора молока. Вип. 13. Т.1. 1. DOI: 10.31388/2220-8674-2023-1 -1

23. Самойчук К. О., Кюрчев С. В., Паляничка Н. О., Верхованцева В. О. Впровадження високоефективного обладнання для диспергування емульсій в технологічну лінію переробки молока. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання / ТДАТУ, 2022. – Вип. 12, том 2. (1) DOI: 10.31388/2220-8674-2022-2-1

РОЗДІЛ 10

**ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПЛІВКОВОГО
ТЕПЛООБМІННИКА ДЛЯ ШВИДКОГО ОХОЛОДЖЕННЯ**

РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження є процеси швидкого охолодження та заморожування напоїв, зокрема із застосуванням плівкових теплообмінників та вакуумного охолодження.

Предметом дослідження є технологічні, конструктивні та гідравлічні параметри обладнання для охолодження напоїв, а також математичні залежності, що описують вплив тиску та форми теплообмінних поверхонь на якість і енергоефективність процесу.

Метою дослідження є зниження енергетичних витрат при забезпеченні високої якості охолодження напоїв шляхом обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів плівкових охолоджувачів проточного типу та аналізу математичних моделей вакуумного охолодження.

Методи досліджень. Використано теоретичні методи: класична гідродинаміка, моделі тепло- та масообміну, рівняння Антуана та рівняння масопереносу.

Застосовано математичну обробку формул, що описують зміну температури та швидкість випаровування.

Виконано комп'ютерне моделювання процесів охолодження та заморожування, а також експериментальні дослідження в лабораторних умовах за традиційними та розробленими методиками.

Основні результати досліджень:

Встановлено, що для плівкового випарника коефіцієнт тепловіддачі від плівки яблучного соку до стінки на порядок вищий, ніж при об'ємній теплопередачі, що обґрунтовує доцільність використання охолоджувачів напоїв проточного типу.

Запропоновано методику визначення критеріїв плівкового теплообміну та основних конструктивних параметрів охолоджувача, яка може бути використана при проектуванні обладнання.

Доведено практичну значимість застосування плівкових випарників для швидкого охолодження фруктових, овочевих, плодоовочевих соків та інших напоїв (пиво, квас, лимонад).

Встановлено, що рівняння Антуана є ключовим для визначення температури кипіння вологи під час вакуумного охолодження: зниження

тиску призводить до інтенсивнішого випаровування та швидшого охолодження.

Рівняння масопереносу описує кінетику процесу, визначаючи швидкість втрати маси та механізм відведення тепла.

Сформовано теоретичний висновок, що саме тиск є визначальним фактором швидкості охолодження у вакуумних умовах.

Ключові слова: швидке заморожування, плівковий охолоджувач напоїв, ефективність теплообміну, вакуумне охолодження, тиск, масоперенос, діаметр жирових кульок.

Таким чином, поєднання плівкових та вакуумних методів охолодження дозволяє забезпечити високу якість продукції при значному зниженні енерговитрат, що має важливе практичне значення для сучасної харчової промисловості.

ВСТУП

Сучасна харчова промисловість характеризується зростаючими темпами виробництва заморожених та охолоджених продуктів, що зумовлено підвищеним попитом на конкурентоспроможну продукцію вітчизняних виробників. Освоюються нові види товарів із застосуванням сучасних технологій пакування та укупорювання, удосконалюються традиційні методи, розширюється номенклатура сировини та готової продукції.

Одним із перспективних напрямів розвитку є створення технологій швидкісного охолодження напоїв та харчових продуктів. Ефективним способом у цьому контексті є плівковий теплообмін, який забезпечує високу швидкість охолодження у поєднанні з простотою санітарно-гігієнічної обробки обладнання. Використання плівкових випарників дозволяє значно інтенсифікувати процеси підготовки та зберігання продукції, що має важливе практичне значення для плодоовочевої консервної промисловості.

Поряд із цим, перспективним методом є вакуумне охолодження, яке забезпечує швидке зниження температури продуктів із високим вмістом вологи та рівномірний розподіл температури всередині них. Така технологія поєднує високу ефективність із екологічною безпечністю, оскільки не потребує використання хімічних консервантів. Її дія базується на інтенсивному випаровуванні вологи при зниженому тиску, що супроводжується значними втратами тепла завдяки високій питомій теплоті пароутворення.

Умовою інтенсифікації вакуумного охолодження є створення оптимального рівня тиску, при якому температура кипіння вологи всередині

продукту знижується до необхідного значення. Це визначає фундаментальну роль математичних моделей, що описують залежність між тиском, швидкістю охолодження та якістю кінцевого продукту.

Таким чином, дослідження, розробка та впровадження удосконалених технологій охолодження – плівкового та вакуумного – є актуальним завданням сучасної харчової промисловості, спрямованим на підвищення енергоефективності виробництва, забезпечення високої якості та екологічної безпечності харчових продуктів.

ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження проводилися протягом 2018-2022 рр. на базі кафедри ОПХВ імені професора Ф. Ю. Ялпачика Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного.

Метою роботи є експериментальне підтвердження положень, викладених в попередніх працях та створення передумов до подальших досліджень по розробці та впровадженню технологічної документації з використання замороженої сировини для виробництва соків і подальшого їх зберігання у замороженому виді.

Програмою досліджень передбачено:

1. Удосконалення пристрою для швидкого заморожування харчових продуктів шляхом зміни конструкції, підвищення градієнту від'ємних температур за рахунок застосування додаткового другого каскаду холодильного циклу повітряної холодильної машини, а саме під'єднання *групи трубок* Ранка-Хілша, що забезпечує запобігання змерзанню харчових продуктів під час обробки, збереження окремих та неушкоджених фрагментів харчових продуктів, зменшення витікання клітинного соку, та ушкодження під час фазового переходу, більш повно використання морозильних властивостей холодоагента та підвищення інтенсивності процесу заморожування.

2. Удосконалення конструкції охолоджувача напоїв шляхом введення нових конструктивних елементів, що призводить до спрощення конструкції, усунення проміжного теплоносія, підвищення ефективності теплообміну, збільшення ККД і надійності установки в цілому, спрощення санітарно-гігієнічної обробки обладнання.

3. Визначення критеріїв плівкового теплообміну та основні конструктивні параметри охолоджувача напоїв проточного типу

У пристрої для швидкого заморожування харчових продуктів, що містить теплоізолювану камеру охолодження з транспортером із гідрофобним покриттям, над яким розташовано подавальну трубу та вологовідокремлювач, зовні встановлені компресор, за ним теплообмінник-

охолоджувач, який знаходиться в тепловому контакті з випарником холодильника, далі ресивер та терморегулюючий вентиль вихід якого під'єднаний до подавальної труби, згідно пропонованого винаходу, до подавальної труби під'єднана група трубок Ранка-Хілша.

Застосування пристрою для швидкого заморожування харчових продуктів запропонованої конструкції дозволяє зменшити явище змерзання харчових продуктів під час обробки, зберегти окремі та неушкоджені фрагменти харчових продуктів, зменшити витікання клітинного соку та ушкодження під час фазового переходу, завдяки підвищенню градієнта від'ємних температур при застосуванні додаткового другого каскаду холодильного циклу повітряної холодильної машини, а також дозволяє більш повно використовувати морозильні властивості холодоагента та підвищити інтенсивність процесу заморожування.

Пристрій для швидкого заморожування харчових продуктів містить теплоізольовану камеру 1 охолодження, транспортер 2 з гідрофобним покриттям, подавальну трубу 3, теплообмінник-охолоджувач 4, випарник 5 холодильника, ресивер 6, терморегулюючий вентиль 7, вологовідокремлювач 8, компресор 9, до подавальної труби 3 під'єднана група трубок 10 Ранка-Хілша.

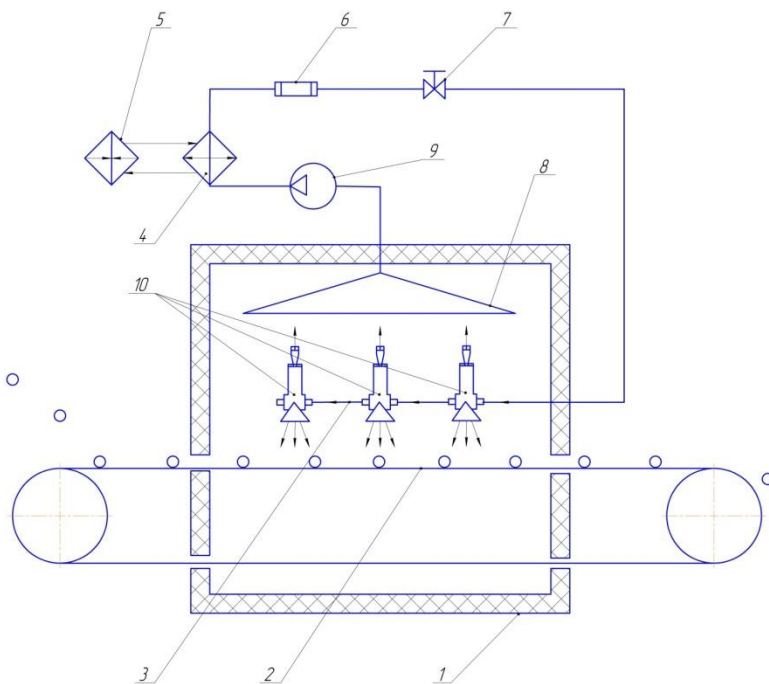


Рис. 1. Пристрій для швидкого заморожування харчових продуктів:
1 – теплоізольована камера охолодження, 2 – транспортер з гідрофобним покриттям, 3 – подавальна труба, 4 – теплообмінник-охолоджувач, 5 – випарник холодильника, 6 – ресивер, 7 – терморегулюючий вентиль, 8 – вологовідокремлювач, 9 – компресор, 10 – група трубок Ранка-Хілша

Принцип дії пропонованого пристрою для швидкого заморожування полягає в наступному. В теплоізольовану камеру 1 охолодження, по транспортеру 2 з гідрофобним покриттям тонким шаром подаються харчові продукти. Гідрофобне покриття стрічки транспортера перешкоджає прилипанню харчових продуктів, які заморожують. Швидкість руху стрічки транспортеру 2 регламентує час експозиції матеріалу в теплоізольованій камері 1 охолодження. Через подавальну трубу 3 та групу трубок 10 Ранка-Хілша на матеріал подається переохоложене повітря, яке виконує роль холодоагенту. Відпрацювавший холодоагент надходить до приймального патрубка ($t_{\text{роб}} = -10 \text{ }^{\circ}\text{C}$) вологовідокремлювача 8, звідки всмоктується компресором 9, який стискує сухе холодне повітря. Холодоагент при адіабатному стисненні нагрівається ($t_{\text{нагр}} = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$) і далі охолоджується в теплообміннику-охолоджувачі 4, за рахунок теплообміну з випарником 5 холодильника до $-18 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Запас переохоложеного стисненого повітря накопичується в ресивері 6, який знаходиться у теплоізолюючій оболонці. Переохоложене стиснене повітря проходить крізь фільтр (не показано) до терморегулюючого вентиля 7, після якого відбувається різке розширення холодного стисненого повітря і різке до охолодження робочого холодоагенту, який через *подавальну трубу 3 та групу трубок 10 Ранка-Хілша*, дозволяє значно інтенсивніше охолоджувати харчові продукти ($t = -60 \text{ }^{\circ}\text{C}$). При цьому холодоагент завдяки трубкам Ранка-Хілша розподіляється на два потоки $-60 \text{ }^{\circ}\text{C}$, спрямованого на матеріал, та прохолодне повітря $-8 \text{ }^{\circ}\text{C}$, яке надходить до приймального патрубка вологовідокремлювача 8, звідки всмоктується компресором 9. Далі цикл повторюється.

Запропонований нами охолоджувач напоїв проточного типу складається з теплоізольованого корпусу, в ньому змонтовані: змійовик випарника холодильної машини в циліндричній оболонці з харчової нержавіючої сталі і верхня кільцева камера для напою, яка встановлена із щільним зазором відносно циліндричної оболонки. Окремо розташований насос, труби для подачі напою, розливний вентиль.

Функціональна схема плівкового охолоджувача напоїв проточного типу показана на рис.2.

Принцип дії пропонованого пристрою полягає в наступному. Напій, який необхідно охолодити, насосом 1 через трубу 2 для подачі напою, подається у встановлену в теплоізольованому резервуарі 3, верхню кільцеву камеру 4 для напою. У верхній кільцевій камері 4, яка охоплює циліндричну оболонку 7 змійовика 6 випарника холодильної машини, підтримується постійний рівень напою вище верхньої кришки циліндричної оболонки 7.

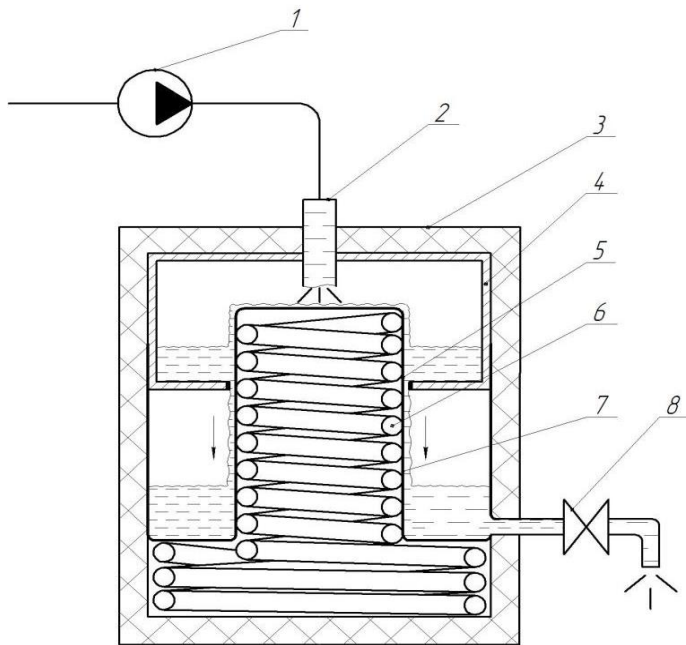


Рис. 2. Функціональна схема плівкового охолоджувача напоїв:

1 – насос, 2 – труба для подачі напою, 3 – теплоізолюваний корпус, 4 – верхня кільцева камера для напою, 5 – щілинний зазор, 6 – змійовик випарника холодильної машини, 7 – циліндрична оболонка змійовика, 8 – розливний вентиль.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Визначимо критерії плівкового теплообміну та основні конструктивні параметри охолоджувача напоїв проточного типу.

В якості охолоджувальної рідини, для прикладу, виберемо яблучний сік. Температура яблучного соку: на вході $t_1 = 35 \text{ }^\circ\text{C}$, на виході $t_2 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Витрата яблучного соку $G_C = 31 \text{ кг / год}$ або $0,52 \text{ л / хв}$. Питома теплоємність яблучного соку $c = 3,2 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$. Щільність яблучного соку $\rho = 1051 \text{ кг/м}^3$. Коефіцієнт теплопровідності яблучного соку $\lambda = 0,554 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$.

Теплове навантаження для відводу теплоти від охолоджуваного яблучного соку

$$Q_{я.с.} = G_{я.с.} \cdot c \cdot (t_1 - t_2) = 31 \cdot 3,2 \cdot (35 - 20) = 1488 \text{ кДж} \quad (1)$$

Питома холодопродуктивність установки

$$q_0 = h_1 - h_4 = 340 - 268 = 72 \text{ кДж / кг.} \quad (2)$$

Коефіцієнт корисної дії плівкового теплообмінника - $\eta = 0,9$.

Тепловий баланс плівкового охолоджувача:

$$Q_{я.с} = Q_{охл}, \text{ или } G_{я.с} \cdot c \cdot (t_1 - t_2) = G_{охл} q_0 \eta. \quad (3)$$

З виразу теплового балансу [14] отримуємо значення витрати охолоджувача

$$G_{охл} = \frac{G_{я.с} \cdot c \cdot (t_1 - t_2)}{\eta \cdot (h_1 - h_4)} = 31/3600 \cdot 3,2 \cdot (35-20)/(0,9 \cdot 120) = 0,038 \text{ кг/с}. \quad (4)$$

За значенням масової витрати визначаємо швидкість потоку яблучного соку, при діаметрі циліндричної оболонки змійовика випарника холодильної машини $D = 0,2 \text{ м}$:

$$W = \frac{G_{я.с.}}{\pi \cdot D^2 / 4} = (31/3600) \cdot 4 / (3,14 \cdot 0,2^2) = 0,27 \text{ м/с}. \quad (5)$$

Розрахуємо поверхню теплообміну:

$$F = \frac{Q_0}{k \cdot \Delta t} \cdot \tau \quad (6)$$

де: F - площа поверхні теплообміну, м^2 ; $Q_{охл}$ - витрата теплоти, Дж/с ; k - коефіцієнт теплопередачі, $\text{Дж} / (\text{с} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К})$; Δt - різниця температур, К ; τ - час охолодження, с .

$Q_{охл}$ тепловий ефект плівкового випарника, розраховуємо за спрощеною формулою:

$$Q_{охл} = G_{охл} q_0 \eta = 0,038 \cdot 72 \cdot 0,9 = 2,46 \text{ кДж/с}. \quad (7)$$

Коефіцієнт теплопередачі визначаємо за формулою

$$k_D = \frac{1}{\frac{1}{a_{я.с.}} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{a_o}} \quad (8)$$

де $a_{я.с.}$ - коефіцієнт тепловіддачі яблучного соку.

Критерій Рейнольдса для потоку яблучного соку:

$$R_e = \frac{W \cdot D \cdot \rho}{\mu} = 0,27 \cdot 0,2 \cdot 1051 / (109 \cdot 10^{-6}) = 502679 \quad (9)$$

де $\rho_{я.с.}$ - щільність яблучного соку, $1051 \text{ кг} / \text{м}^3$;

$\mu_{я.с}$ - динамічна в'язкість яблучного соку, $109 \cdot 10^{-6}$ Па·с.

За значенням критерію Рейнольдса визначаємо критерій Прандтля і критерій Нусельта:

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\mu \cdot c \cdot \rho}{\lambda} = (109 \cdot 10^{-6}) \cdot 3,2 \cdot 1051 / 0,554 = 0,69 \quad (10)$$

$$Nu = 0,021 \cdot (Rr^{0,3} \cdot Pr^{0,4}) = 0,021 \cdot 502679^{0,3} \cdot 0,69^{0,4} = 66,369 \quad (11)$$

Звідси, знаходимо коефіцієнт тепловіддачі від плівки яблучного соку до стінки α_1 знаходимо за спрощеною формулою для плівкового випарника:

$$\alpha_1 = \frac{\lambda}{\delta_{пл}} = 0,554 / 0,0002 = 2770 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \quad (12)$$

де $\delta_{пл}$ - товщина плівки яблучного соку на циліндричній оболонці зміювика випарника холодильної машини, $\delta_{пл} = 0,002$ м.

Коефіцієнт тепловіддачі від стінки до охолоджуючої рідини α_2

$$\alpha_2 = \frac{\lambda \cdot Nu}{D} = 0,0730 \cdot 400 / 0,2 = 145 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \quad (13)$$

Коефіцієнт теплопередачі визначаємо за формулою (7):

$$k = 1 / (1/2770 + 0,002/62 + 1/145) = 147 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Тоді площа поверхні теплообміну циліндричної оболонки зміювика випарника холодильної машини за формулою (6), буде:

$$F = \frac{Q_0}{k \cdot \Delta t} \cdot \tau = 2460 / (147 \cdot 45) \cdot 1 = 0,277 \text{ м}^2.$$

Висота циліндричної оболонки зміювика випарника холодильної машини

$$H = (F \cdot \pi \cdot D^2 / 4) / \pi \cdot D = (0,277 \cdot 3,14 \cdot 0,2^2 / 4) / (3,14 \cdot 0,2) = 0,39 \text{ м}. \quad (14)$$

Аналіз роботи вчених F. C. Schmidt, A. C. C. Silva, E. Zanoelo, J. B. Laurindo та їх наукової роботи під назвою «Kinetics of vacuum and air cooling of chicken breasts arranged in stacks» показав, що вони обрали Рівняння Антуана (зв'язок тиску насиченої пари і температури насичення). Стандартний вигляд рівняння Антуана, який використано в роботі, має форму:

$$\log_{10}(P) = A - \left(\frac{B}{T + C} \right)$$

де

P-тиск

T-температура

A, B, C- константи, унікальні для кожної речовини, які визначаються експериментально

В роботі рівняння представлено в еквівалентному вигляді (для знаходження T_m при відомому P):

$$T_m = \left(\frac{B}{A - \log_{10} P} \right) - C [1]$$

Продовжуючи своє дослідження вони обчислювали зміну маси зразків під час вакуумного охолодження (Δm) за допомогою рівняння, що базується на енергетичному балансі, враховуючи, що тепло передається від продукту до навколишньої пароповітряної суміші виключно за рахунок випаровуваної вологи.[1]

Рівняння виглядає так:

$$m * c * \Delta T_m = \Delta m * \Delta H$$

де

m - маса продукту (кг),

c - питома теплоємність ($\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$)

ΔT_m - зміна середньої температури (°C) за крок Δt

Δm - маса випарованої вологи (кг) за той же крок

ΔH - ентальпія випаровування води ($\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$)

Це рівняння показало, що швидкість охолодження визначається кількістю теплоти, яка витрачається на випаровування. Однак саме масоперенос, а не теплоємність, є лімітуючим фактором процесу, тому вплив тиску проявляється непрямо — через інтенсивність випаровування.

Далі було розглянуто роботу науковців Enhai Liu, Xiaobo Hu, Shengyong Liu. Вони дослідили вплив вакуумного охолодження на листовий салат у роботі «Theoretical Simulation and Experimental Study on Effect of Vacuum Pre-Cooling for Postharvest Leaf Lettuce»

У роботі було представлено таке рівняння:

$$\frac{d_m}{d_t} = k_m k_c V (P_i - P')$$

Де

1. $\frac{d_m}{d_t}$ - Швидкість втрати маси (масовий потік). Це швидкість випаровування води з продукту, яка прямо пропорційна швидкості охолодження в процесі вакуумного охолодження
2. k_m - Коефіцієнт масопередачі (коефіцієнт переносу маси). Відображає інтенсивність перенесення пари води з поверхні продукту в об'єм вакуумної камери.
3. k_c Ефективний коефіцієнт випаровування. Враховує ефективність доступу води до поверхні випаровування (наприклад, пористість або внутрішній опір матеріалу).
4. V - Об'єм вакуумної камери або об'єм продукту, що охолоджується (залежно від конкретної моделі).
5. P_i -Тиск у вакуумній камері (робочий тиск). Це фактичний абсолютний тиск, підтримуваний у камері.
6. P' - Тиск насичення водяної пари (на поверхні продукту). Це тиск, який відповідає температурі водяної пари на поверхні продукту або всередині нього. Він є функцією температури T через рівняння Антуана або інші співвідношення.
7. $(P_i - P')$ - Рушійна сила масопередачі. Різниця тисків, що визначає швидкість, з якою пара переміщується з продукту (вищий тиск P') в камеру (нижчий тиск P_i). Чим більша ця різниця, тим швидше відбувається випаровування і, відповідно, швидше охолодження.

Це рівняння походить із класичної теорії тепломасообміну і застосовується для опису процесу випаровування води з пористого вологовмісткого середовища під час вакуумного охолодження.

Це рівняння виявляється найінформативнішим оскільки швидкість втрати маси прямо пропорційна різниці між тиском у камері та тиском насичення. Тобто воно безпосередньо показує, що чим нижчий тиск, тим більший градієнт тиску, а отже тим швидше відбувається випаровування і, як ми знаємо, тим інтенсивніше знижується температура.

ВИСНОВКИ

Аналіз проведених аналітичних та експериментальних досліджень підтвердив доцільність використання плівкових та вакуумних методів охолодження для підвищення ефективності процесів у харчовій промисловості.

Для плівкового випарника встановлено, що коефіцієнт тепловіддачі від плівки яблучного соку до стінки на порядок вищий, ніж при об'ємній теплопередачі. Це обґрунтовує застосування охолоджувачів напоїв проточного типу, які забезпечують швидке охолодження фруктових, овочевих та плодоовочевих соків, а також напоїв (пиво, квас, лимонад).

Розроблена методика визначення критеріїв плівкового теплообміну та основних конструктивних параметрів охолоджувача може бути використана при проектуванні нового обладнання для харчової галузі.

Комплексний аналіз процесу вакуумного охолодження дозволив виділити дві ключові математичні моделі:

Рівняння Антуана, яке визначає термодинамічні межі процесу та залежність температури кипіння від абсолютного тиску в камері.

Рівняння масопереносу, що описує кінетику процесу, швидкість випаровування та механізм відведення тепла.

Доведено, що найбільш точне прогнозування швидкості охолодження у вакуумі базується на масових рівняннях, які враховують градієнт між тиском насичення у продукті та робочим тиском у камері.

Таким чином, використання плівкових випарників та вакуумних охолоджувачів забезпечує високу ефективність теплообміну, зниження енерговитрат та можливість отримання продукції з високими якісними показниками, що має значне практичне значення для впровадження у виробництво.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Пат. 124221, Україна: МПК F25D 3/11. Пристрій для швидкого заморожування харчових продуктів / Тарасенко В.Г., Петров В. О., Кюрчев С. В., Стручаєв М І., Чердаклієв А. А., Бондар Д. В. заявник і патентовласник Таврійський державний агротехнологічний університет. – №а 2019 03184\$ заявл. 01.04.2019; опубл. 03.02.2022. Бюл. № 5/2022.

2. Тарасенко В.Г., Фучаджи Н. О., Червоткіна О.О. Удосконалення способу охолодження напоїв // Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання. Мелітополь: ТДАТУ, 2022. Вип. 12, т. 2. с. 165-172.

РОЗДІЛ 11

ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИКИ ПРОЦЕСУ ЛУЩЕННЯ УДАРОМ В ЛУЩИЛЬНОМУ ПРИСТРОЇ УДАРНОЇ ДІЇ

РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження є процес лушення власнокруп'яних культур ударом.

Предметом дослідження являються закономірності впливу технологічних та кінематичних параметрів процесу лушення власнокруп'яних культур прямим ударом на його якісні показники.

Метою дослідження є аналіз процесу лушення власнокруп'яних культур на лущильному пристрої ударної дії.

Методи досліджень. Поставлені задачі вирішувались з використанням теоретичних методів дослідження і експериментальним шляхом в лабораторних умовах за традиційними та розробленими методиками.

Основні результати досліджень: знайдено та експериментально підтверджено відповідність отриманої залежності для визначення енергетики процесу лушення у лущильному пристрої ударної дії. Отримане рівняння для визначення питомої енергоємності процесу лушення у лущильному пристрої ударної дії дозволяє визначити цей показник урахуванням основних технологічних параметрів пристрою, режимних показників та фізико-механічних властивостей сировини. При аналізі процесу лушення було проаналізовано не лише коефіцієнт ефективності лушення, а й його складники окремо. Це було зумовлено тим, що узагальнена оцінка процесу не дає змоги оцінити окремий вплив технологічної та технічної ефективності. В результаті експериментальних досліджень лише при одноразовому пропусканні гречки були отримані наступні показники: коефіцієнт цілісності ядра в межах 69,8 - 71,2%, коефіцієнт лушення – 49,6 – 50, 0 %, ефективність лушення – 32 – 35 %.

ЕНЕРГОЄМНІСТЬ ПРОЦЕСУ ЛУЩЕННЯ, КОЕФІЦІЄНТ ЦІЛІСНОСТІ ЯДРА, КОЕФІЦІЄНТ ЛУЩЕННЯ, ЕФЕКТИВНІСТЬ ЛУЩЕННЯ, ЛУЩИЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ УДАРНОЇ ДІЇ.

ВСТУП

Визначення напрямків розвитку наукового потенціалу галузі переробки зерна належить вітчизняним ученим, якими створені наукові школи по рішенню практичних і теоретичних проблем удосконалення технологій виробництва продовольчих товарів. Визначення напрямків розвитку

наукового потенціалу галузі переробки зерна належить вченим, якими створені наукові школи по рішення практичних і теоретичних проблем удосконалення технологій виробництва круп. Відповідно до результатів цих розробок, спрямованих на рішення наукових та практичних проблем створення та удосконалення енерго- і ресурсозберігаючих технологій переробки зерна розроблено Державні стандарти на зерно, Правила організації та ведення технологічних процесів на зернопереробних підприємствах, Державні стандарти на хлібопродукти та продовольчі товари і інша нормативно-технічна та технологічна документація для зернопереробної галузі..

Проблема вдосконалення луцильного обладнання і створення комплексних технологічних ліній малої потужності набуває для України великого народногосподарського значення та актуальності, оскільки сучасні способи й технологічні засоби відокремлення оболонки зерна у сільськогосподарському виробництві є недостатньо ефективними і потребують подальшого дослідження та вдосконалення. Проведено дослідження роботи луцильного пристрою ударної дії, конструкція якого дозволяє вилучити операцію попереднього сортування на фракції та скоротити кількість пропусків гречки.

Проведені теоретичні дослідження дозволили визначити закономірність між питомою енергоємністю процесу луцення у луцильному пристрої ударної дії та його конструктивними і кінематичними параметрами, та фізико-механічними характеристиками зернівки.

ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження проводилися на базі кафедри ОПХВ імені професора Ф. Ю. Ялпачика Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного.

Метою експериментальних досліджень є перевірка справедливості теоретичних досліджень, конкретизація математичного опису взаємозв'язку технологічної ефективності з технологічними показниками роботи. Ефективність процесу луцення – критерій значення і характер зміни якого можна визначити лише експериментальним шляхом.

Програмою досліджень передбачено:

1. встановлення залежності між технологічною ефективністю процесу луцення власнокруп'яних культур ударом та його технологічними параметрами;

2. порівняльний аналіз теоретичних та експериментальних результатів.

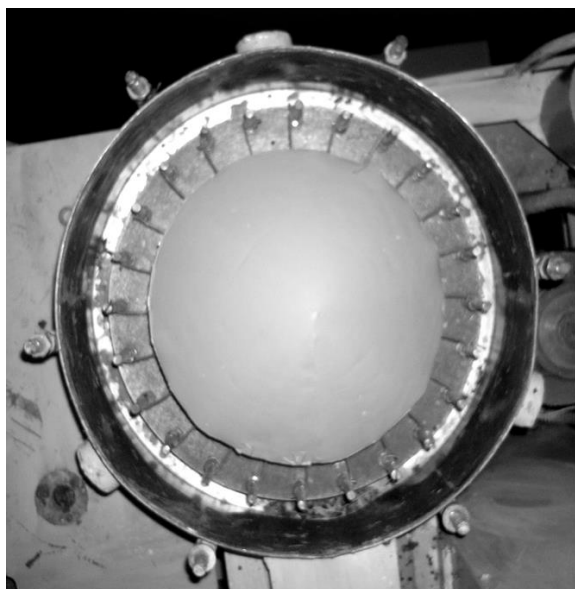
Для досліджень ефективності луцення та питомих витрат електричної енергії процесу було виготовлено луцильний пристрій ударної дії зі зміною частотою обертання та подачею. На рис 1 показано зовнішній вигляд пристрою. Луцильний пристрій ударної дії складається з наступних основних функціональних блоків: живильного вузлу, луцильної камери та приводу.

Пристрій для луцення зерна містить живильний вузол, який складається з живильного бункера 1 та напрямного конуса 2 зверненого основою до диска 3. Диск 3 розташований в порожнині корпусу 4 та жорстко закріплено в горизонтальному положенні на валу 5. Над диском 3 встановлені струни 6, одним кінцем радіально закріплені у струнорозподільнику 7, який прилаштовано до вала 5, а іншим — у струнотримачі 8. Струнорозподільник 7 виконано у вигляді циліндру з наскрізними отворами рівномірно розташованими по колу на одній висоті, у яких фіксуються струни.

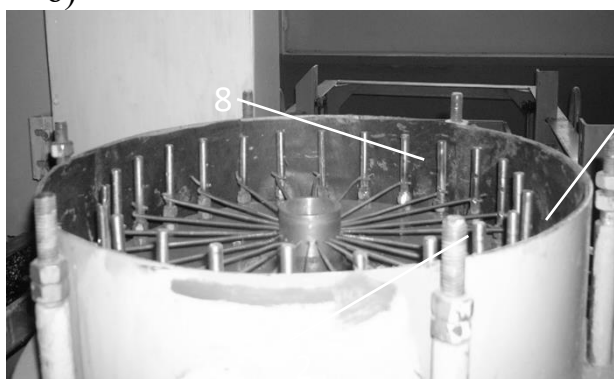
Струнотримачі 8 розташовано на периферії диска 3 та відокремлено від корпусу 4 перегородкою 9, яка перешкоджає виникненню ефекту «молоткової дробарки». Продукти луцення видаляються з поверхні диска за рахунок відцентрової сили. У порожнині під диском встановлена крильчатка 10, яка сприяє прискоренню видалення продуктів луцення до вихідного патрубку 11.

Попередньо очищене зерно без сортування на фракції за розміром надходило до живильного бункера 1 та, проходячи по каналу, створеному корпусом 4 та напрямним конусом 2, надходить до робочої зони, яка створюється диском 3, закріпленим жорстко в горизонтальній площині на валу 5, та корпусом 2. Таке подавання забезпечує надходження зерна до периферії диска 2, тим самим реалізується одноразовий прямий удар, при якому на зернівку діє однакова руйнівна сила. В площині перпендикулярній площині падіння зерна обертаються струни 5, що забезпечує постійність прямого удару.

а)



б)



в)

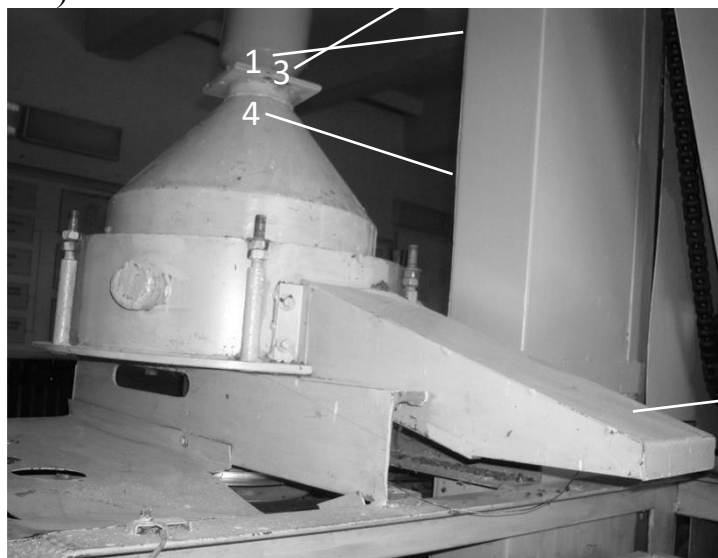


Рис. 1. Лушильний пристрій ударної дії

Запропонована конструкція струнорозподільника 7 та струнотримача 8 дозволяє встановлювати необхідну для технологічного процесу кількість струн на будь-якому рівні вздовж струнотримача. Для забезпечення відсутності дроблення зерна струнотримач 8 розташовано на периферії

диска 3 та відокремлено від корпусу 4 перегородкою 9. Далі продуктам лушення за рахунок відцентрового прискорення, яке виникає при обертанні диска 3, надається кінетична енергія, яку спрямовують на їх видалення з зони лушення. Потім продукти лушення просипаються у зазор, який створюється диском 3 та корпусом 4, після чого попадають до порожнини під диском 3, та за допомогою крильчатки 10 надходять до вихідного патрубку 11 та направляються на подальшу переробку.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Метою реалізації процесу лушення власнокруп'яних культур ударом є руйнування оболонки власнокруп'яних культур при умові збереження цілісності ядра. Оскільки ефективність лушення залежить від цілого ряду параметрів процесу та фізико-механічних властивостей сировини, то за допомогою теоретичних досліджень її визначити неможливо.

В задачу досліджень входило: відбирання факторів, що впливають на якість лушення, проведення експериментів по описанню процесу лушення власнокруп'яної сировини рівнянням регресії, отримання оптимальних технологічних показників для ефективного реалізації процесу лушення власнокруп'яних культур ударом.

При теоретичному дослідженні, апріорному вивченні та проведенні параметризації процесу лушення власнокруп'яних культур ударом було виявлено фактори, що у найбільшій мірі впливають на ефективність лушення та енергетичні витрати технологічної операції: частота обертання струн; подача; відстань від осі обертання струни до точки її співударяння з зернівкою; кількість встановлених струн.

Удар струни о зернівку є квазіупругим, оскільки частина енергії, що виникає при ударі, переходить до залишкової деформації та нагріву тіл.

Кінетична енергія, що втрачається при ударі струни о зернівку визначається рівнянням

$$W_0 - W_1 = \frac{1-k}{1+k} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot M_c \cdot (v_c - u_c)^2 + \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_z - u_z)^2 \right], \quad (1)$$

де W_0 – кінетична енергія системи до удару, Дж;

W_1 – кінетична енергія системи після удару, Дж;

M_c – маса системи, кг;

m – маса зернівки, кг;

v_c – швидкість системи до удару, м/с;

u_c – швидкість системи після удару, м/с;

v_z – швидкість зернівки до удару, м/с;

u_z – швидкість зернівки після удару, м/с.

Оскільки лінійна швидкість струни у момент зіткнення значно перевищує лінійну швидкість зернівки, то доцільним є припустити, що $v_z = 0$.

Тоді

$$W_I = \frac{M_c}{M_c + m} \cdot W_0 \quad (2)$$

У нашому випадку маса зернівки значно менша за масу системи, яка здійснює удар, тобто $M_c + m \approx M_c$, а відповідно й $W_I \approx W_0$. Виходячи з цього, хоча удар й є непружним, втрат енергії при ударі практично не відбувається, та зернівка отримує енергію майже без втрат.

Швидкість точок твердого тіла при сферичному русі в кожний момент часу можна розглядати як обертання навколо миттєвої осі обертання. При цьому величина моменту інерції неоднакова у різних точках системи оскільки змінюється й відстань від осі системи до точки, що розглядається. Цьому кінетична енергія тіла, що здійснює сферичний рух у даний момент, визначається за формулою

$$W_i = J_{zi} \cdot \frac{\omega_i^2}{2}, \quad (3)$$

де J_{zi} – момент інерції системи у i -тій точці, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

ω_i – кутова швидкість обертання струни у i -тій точці, с^{-1} .

Відповідно до формули Ейлера

$$\omega_i = \frac{v_i}{R_i}, \quad (4)$$

де v_i – лінійна швидкість обертання струни у i -тій точці робочої зони, м/с ;

R_i – i -те значення відстані від осі обертання струни до точки співударяння струни з зернівкою, м .

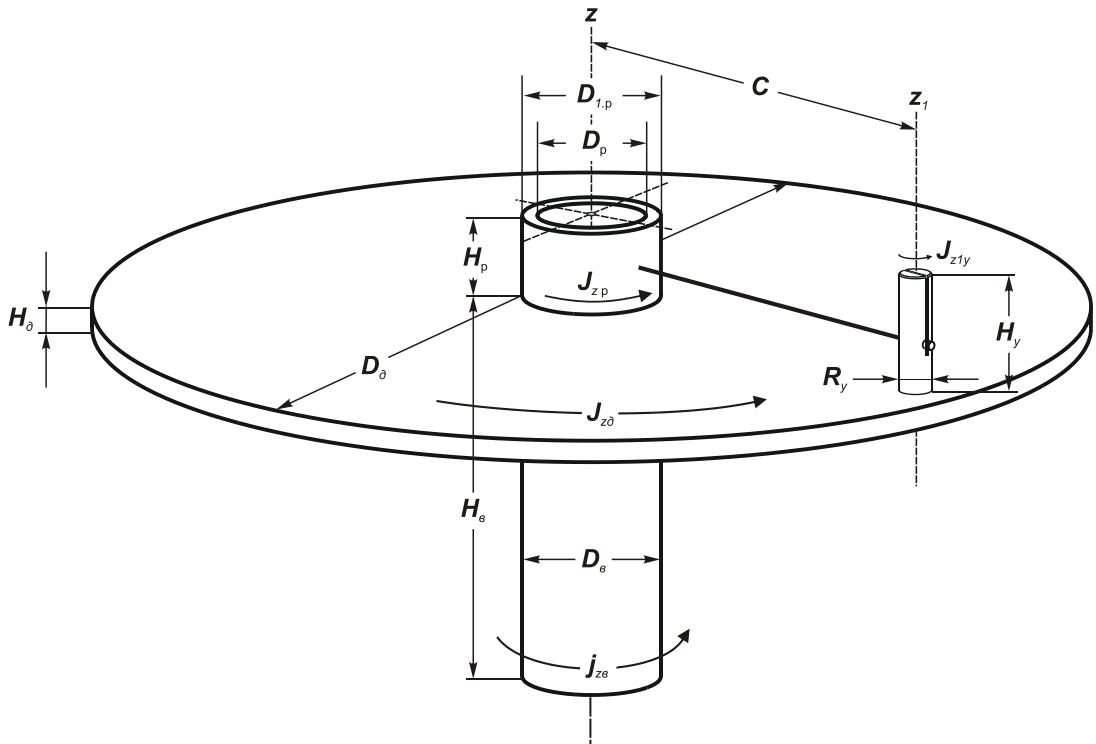


Рис. 3.3. Схема розрахунку моменту інерції системи.

Виходячи з (3) та (4) рівнянь отримаємо вираз

$$W_i = J_z \cdot \frac{v_i^2}{2 \cdot R_i^2} \quad (5)$$

Момент інерції системи у i -тій точці відносно центральної осі системи z складається з суми моментів інерції усіх складових цієї системи у цієї ж точці відносно осі z .

$$J_i = \sum J_j \quad (6)$$

Для нашого випадку: вал (враховується частина вала від підшипникового вузлу та вище), струнорозподільник; диск; струни та струнотримачі.

$$J_z = J_{z\hat{a}} + J_{z\hat{a}} + J_{z\hat{\delta}} + z \cdot (J_{zc} + J_{z\acute{o}}), \quad (7)$$

де $J_{z\hat{b}}$ – момент інерції вала, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

$J_{z\hat{o}}$ – момент інерції диска, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

$J_{z\hat{p}}$ – момент інерції струнорозподільника, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

J_{zc} – момент інерції струни, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

$J_{z\hat{y}}$ – момент інерції струнотримача, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

z – кількість струн, а, відповідно, й струнотримачів, шт.

Для визначення моментів інерції частин системи скористаємося методикою визначення моментів інерції однорідних тіл відносно їх власних центральних осей. Власні центральні осі вала, диска та струнорозподільника співпадають з центральною віссю системи, а власні центральні осі струни та струнотримача знаходяться на деякій відстані від неї.

Момент інерції вала відносно центральної осі системи визначається за формулою

$$J_{z_6} = \frac{m_6 \cdot R_6^2}{2}, \quad (8)$$

де m_6 – маса вала, кг;

R_6 – радіус вала, м.

$$m_6 = \pi \cdot \rho_6 \cdot H_6 \cdot R_6^2, \quad (9)$$

де ρ_6 – щільність матеріалу, з якого виготовлено вал, кг/м³;

H_6 – висота вала від центру підшипникового вузлу до диска, м.

Виходячи з (8) та (9), отримаємо вираз для визначення моменту інерції вала відносно осі z

$$J_{z_6} = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \rho_6 \cdot H_6 \cdot R_6^4. \quad (10)$$

Рівняння для визначення моменту інерції диска відносно центральної осі системи має вигляд

$$J_{z_0} = \frac{m_0 \cdot R_0^2}{2}, \quad (11)$$

де m_0 – маса диска, кг;

R_0 – радіус диска, м.

$$m_0 = \pi \cdot \rho_0 \cdot H_0 \cdot R_0^2, \quad (12)$$

де ρ_0 – щільність матеріалу, з якого виготовлено диск, кг/м³;

H_0 – товщина диска, м.

Враховуючи вище викладені вирази (11) та (12) отримаємо

$$J_{z_0} = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \rho_0 \cdot H_0 \cdot R_0^4. \quad (13)$$

Момент інерції струнорозподільника відносно центральної осі буде дорівнювати

$$J_{z\delta} = \frac{m_{\delta} \cdot (R_{1\delta}^2 - R_{2\delta}^2)}{2}, \quad (14)$$

де m_p – маса струнорозподільника, кг;

R_{1p} – зовнішній радіус струнорозподільника, м;

R_{2p} – внутрішній радіус струнорозподільника, м.

$$m_{\delta} = \pi \cdot \rho_{\delta} \cdot H_{\delta} \cdot (R_{1\delta}^2 - R_{2\delta}^2), \quad (15)$$

де ρ_p – щільність матеріалу, з якого виготовлено струнорозподільник, кг/м³;

H_p – висота струнорозподільника, м.

Зважаючи на вирази (14) та (15) отримаємо рівняння

$$J_{z\delta} = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \rho_{\delta} \cdot H_{\delta} \cdot (R_{1\delta}^4 - R_{2\delta}^4) \quad (16)$$

Зважаючи на геометричні розміри та вагу струн доцільним є знехтувати її моментом інерції, тобто прийняти, що

$$J_{zc} = 0. \quad (17)$$

Оскільки відомо, що момент інерції твердого тіла відносно деякої осі дорівнює моменту інерції тіла відносно паралельної вісі, що проходить через його центр мас, доданому до добутку маси тіла на квадрат відстані між осями, то момент інерції струнотримача відносно головної осі системи дорівнює

$$J_{zy} = J_{z_{1y}} + m_y \cdot c^2, \quad (18)$$

де $J_{z_{1y}}$ – момент інерції відносно власної центральної осі z_1 , кг·м²;

m_y – маса струнотримача, кг;

c – відстань від власної центральної осі z_1 до центральної осі системи z , м.

Відносно власної центральної осі момент інерції струнотримача визначається за формулою

$$J_{z_{1y}} = \frac{m_y \cdot R_y^2}{2}, \quad (19)$$

де R_c – радіус струнотримача, м.

$$m_y = \pi \cdot \rho_y \cdot H_y \cdot R_y^2, \quad (20)$$

де ρ_y – щільність матеріалу, з якого виготовлено струнотримач, кг/м³;

H_c – висота струнотримача, м.

Отримаємо вираз

$$J_{z,y} = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \rho_y \cdot H_y \cdot R_y^4. \quad (21)$$

Одержимо рівняння для визначення моменту інерції струнотримача відносно центральної осі системи

$$J_{z,y} = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \rho_y \cdot H_y \cdot R_y^4 + \pi \cdot \rho_y \cdot H_y \cdot R_y^2 \cdot c^2 \quad (22)$$

Після перетворень, одержимо вираз для визначення моменту інерції системи відносно центральної осі

$$J_z = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \rho \cdot H_a \cdot R_a^4 + \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \rho \cdot H_\delta \cdot (R_{1\delta}^4 - R_{2\delta}^4) + \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \rho \cdot H_a \cdot R_a^4 + \frac{1}{2} \cdot z \cdot \pi \cdot \rho \cdot H_\delta \cdot R_\delta^4 + z \cdot \pi \cdot \rho \cdot H_\delta \cdot R_\delta^2 \cdot \tilde{n}^2 \quad (23)$$

Враховуючи вирази (22) та (23), отримаємо рівняння, що дозволить визначити кінетичну енергію системи у будь-якій її точці

$$W_s = \frac{1}{4} \cdot \frac{\pi \cdot v_i^2}{R_s^2} \cdot \left(\rho_a \cdot H_a \cdot R_a^4 + \rho_\delta \cdot H_\delta \cdot (R_{1\delta}^4 - R_{2\delta}^4) + \rho_a \cdot H_a \cdot R_a^4 + z \cdot \rho \cdot H_\delta \cdot R_\delta^4 + \frac{1}{2} z \cdot \pi \cdot \rho \cdot H_\delta \cdot R_\delta^2 \cdot \tilde{n}^2 \right) \quad (24)$$

Маса зернівки значно менша за масу системи, а відповідно й кінетична енергія зернівки значно менша за кінетичну енергію системи, яку вона має у будь-якій точці у робочій зоні вздовж струни. Враховуючи вище викладене доцільним є припущення, що під час удару зернівки надається енергія, що дорівнює кінетичній енергії системи у точці удару.

Оскільки подача q визначає секундне завантаження луцильного пристрою, тоді кількість зернівок, які співударяються зі струнами складе

$$n_o = \frac{1000 \cdot q}{M_{1000} \cdot n}, \quad (25)$$

де q – подача луцильного пристрою, кг/с;

M_{1000} – маса 1000 зерен, кг;

n – частота обертання струн, s^{-1} .

Зважаючи на вище викладене рівняння для визначення енергії, що витрачається привідним двигуном на луцення зерна, матиме наступний остаточний вид

$$\Delta W_i = \frac{250 \cdot \pi \cdot V_i^2 q \cdot z}{R_i^2 \cdot M_{1000}} \left(\rho_6 \cdot H_6 \cdot R_6^4 + \rho_{u.z6} \cdot H_{u.z6} (R_{1u.z6}^4 - R_{2u.z6}^4) + \rho_d \cdot H_d \cdot R_d^4 + z \cdot \rho \cdot H_y \cdot R_y^4 + \frac{1}{2} z \cdot \pi \cdot \rho_y \cdot H_y \cdot R_y^2 \cdot c^2 \right) \quad (26)$$

де z – кількість струн, шт.

Отримане рівняння для визначення питомої енергоємності процесу лущення у лущильному пристрої ударної дії дозволяє визначити цей показник урахуванням основних технологічних параметрів пристрою, режимних показників та фізико-механічних властивостей сировини.

ВИСНОВКИ

1. Технологічний процес лущення ударом слід розглядати як періодичне співударяння струн із рівномірно розподіленим вздовж усієї нижньої поверхні прямого конуса потоком зернівок. Продуктивність процесу залежить від його технологічних параметрів, а також фізико-механічних властивостей продукту, що лущиться.

2. Основний вплив на ефективність процесу лущення ударом здійснює швидкість за якої відбувається зіткнення струни із зернівкою. Отримано рівняння розрахунку критичної швидкості в залежності від основних параметрів процесу ударної обробки сировини.

3. Теоретичні дослідження процесу лущення ударом дозволили отримати функціональне рівняння для визначення його основних технологічних параметрів.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Kyrylo Samoichuk, Natalia Fuchadzhy, Valentyna Verkholyantseva, Iryna Horetska, Taras Hutsol, Tetiana Prylipko, Szymon Glowacki, Tomasz Nurek, Dmytro Sorokin. (2024). The European Green Deal: Determination of the Energy Parameters of the String Husking Device in Buckwheat Processing. Sustainability 2024, 16(2), 940; <https://doi.org/10.3390/su16020940>

2. Kyrylo Samoichuk, Natalia Fuchadzhy, Alexandr Kovalyov, Taras Hutsol, Iryna Horetska, Ruslana Semenyshena, Serhii Yermakov, Anna Rozkosz. Design and Efficiency of a String Hulling Machine for Buckwheat. Agricultural Engineering TOM 28 (2024) DOI: <https://doi.org/10.2478/agriceng-2024-0009>