

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерії та енергетики
Кафедра процесів, машин і обладнання в агроінженерії

Кваліфікаційна робота на правах рукопису

ОЛІЙНИК Андрій Сергійович

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА РЕЖИМІВ РОБОТИ
ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА СИРУ**

208 «Агроінженерія»

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

(підпис)

(ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи
к.т.н., Медведський О.В.

Житомир – 2020

АНОТАЦІЯ

Олійник А. С. **Обґрунтування параметрів та режимів роботи обладнання для виробництва сиру.** – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістр зі спеціальності 208 – агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2020 р.

Кваліфікаційна робота спрямована на встановлення основних напрямків покращення режимів роботи виготовлювачів сирного зерна за рахунок інтенсифікації процесу. На основі виконаного аналізу виготовлювачів сиру запропоновано удосконалити робочий орган-інструмент.

Кваліфікаційна робота вирішує наукову проблему інтенсифікації процесу вимішування сирного зерна у всьому об'ємі місткості виготовлювача сиру. З цією метою у роботі запропонована конструкція робочого органу зі спрямованою дією на часточки сирного згустку.

За результатами теоретичних досліджень встановлено математичні залежності визначення діючих зусиль у розробленому робочому інструменті, отримане рівняння регресії, яке характеризує взаємозв'язок між енергоємністю виробництва та частотою обертання робочого органу.

Ключові слова: виготовлювач сирного зерна, радіальний вигин, енергоємність процесу, потужність приводу, радіус обертання.

ANNOTATION

Oliynyk A. S. **Substantiation of parameters and modes of operation of equipment for cheese production.** – Qualification work on the rights of the manuscript.

Qualifying work for a master's degree in 208 – agroengineering. – Polissia National University, Zhytomyr, 2020.

Qualification work is aimed at establishing the main directions of improving the modes of operation of cheese producers by intensifying the process. Based on the analysis of cheese makers, it is proposed to improve the working body-tool.

Qualification work solves the scientific problem of intensifying the process of kneading cheese grain in the entire capacity of the cheese maker. To this end, the paper proposes the design of the working body with a directed action on the cheese cloth particles.

According to the results of theoretical research, mathematical dependences of determining the effective forces in the developed working tool are established, the regression equation is obtained, which characterizes the relationship between the energy intensity of production and the rotational speed of the working body.

Key words: cheese grain maker, radial bending, process energy consumption, drive power, radius of rotation.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ВИРОБНИЦТВА ТВЕРДОГО СИРУ	6
1.1 Оцінка технологій виробництва твердого сиру	6
1.2. Аналіз конструктивно-технологічних схем виготовлювачів сиру	8
1.3. Висновки до розділу 1	13
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЙНОЇ СХЕМИ КОМБІНОВАНОГО РОБОЧОГО ІНСТРУМЕНТУ	14
2.1. Визначення шляхів удосконалення виготовлювача сиру періодичної дії з вертикальними робочими органами	14
2.2. Встановлення структурно-функціональної схеми робочого органа виготовлювача сиру	16
2.3. Висновки до розділу 2	17
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИМІШУВАННЯ СИРНОГО ЗЕРНА	18
3.1. Визначення кінематичних параметрів розробленого робочого інструменту	18
3.2. Встановлення енергетичних характеристик розробленого різально-вимішувального робочого органу	19
3.3. Висновки до розділу 3	25
ВИСНОВКИ	26
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	27

ВСТУП

Актуальність теми. Складність виробництва сирного зерна полягає у впливі багатьох факторів та параметрів, зокрема це: спосіб згортання молока, режим розрізання сирного згустку та його вимішування, швидкісні режими нагрівання та відбору сироватки, тривалість вказаних процесів та багато інших технологічних моментів [1, 2].

Процес виробництва сирного зерна відбувається за допомогою обладнання, яке можна поділити на дві групи – відкритого та закритого типу. Основним недоліком обладнання відкритого типу є значні втрати тепла робочим середовищем, що викликає перевитрати енергії та додаткову зайву зволоженість виробничого приміщення. Такого типу апарати притаманні для великих обсягів виробництва. Окрім цього у виробничому цеху створюється додаткова вологість, що викликає підвищені вимоги до системи вентиляції, а контакт продукту з оточуючим середовищем може вплинути на його якість. Для незначних обсягів виробництва сиру в умовах невеликих переробних підприємствах більш прийнятні апарати закритого типу, котрі мають назву – виготовлювачі сирного зерна [1, 3].

Робочим середовищем для апаратів закритого типу виступає суміш сироватки із сирним зерном. Проте, динамічні та гідравлічні процеси в апаратах закритого типу не достатньо вивчені. Тому дослідження, спрямовані на пошук та встановлення оптимальних параметрів енергоефективних сировиготовлювачів періодичної дії для невеликих обсягів виробництва є актуальними завданням.

Мета і задачі досліджень. Мета досліджень – підвищення ефективності виробництва сирного зерна шляхом обґрунтування конструктивно-кінематичних параметрів сировиготовлювача періодичної дії.

Для досягнення вказаної мети необхідно вирішити такі завдання:

- оцінити технологічні схеми і обладнання виробництва твердого сиру та обґрунтувати конструктивну схему сировиготовлювача періодичної дії;

- виконати теоретичні дослідження удосконаленого робочого інструменту сировиготовлювача періодичної дії;
- встановити оптимальні значення конструктивно-кінематичних параметрів удосконаленого робочого інструменту;
- виконати оцінку показників ефективності сировиготовлювача періодичної дії з удосконаленим робочим інструментом.

Об'єкт дослідження – технологічні параметри та режими роботи виготовлювача сиру періодичної дії.

Предмет дослідження – встановити закономірності впливу конструктивно-технологічних параметрів на режимні процеси виготовлювача сиру періодичної дії.

Методи досліджень. При вирішенні поставлених завдань використовували основи теорії математичного моделювання з використанням основних положень фізики суцільного середовища, теплотехніки та гідродинаміки. Результати досліджень оброблялись з використанням програмного продукту Excel.

Апробація результатів роботи. Основні положення та результати досліджень кваліфікаційної роботи доповідались і отримали позитивну оцінку на міжнародній конференції та відображені у наступних роботах:

1. Олійник А. С. Оцінка виготовлювачів сирного зерна. *Матеріали науково-практичної конференції «Наукові читання–2020»*. Житомир: ЖНАЕУ, 2020. С. 214–215.

2. Олійник А. С. Аналіз робочих органів виготовлювачів сиру. *Матеріали науково-практичної конференції «Студентські читання–2020»*. Житомир: ПНУ, 2020. С. 94–95.

3. Олійник А. С. Оцінка технологічної ефективності виробництва сиру. *Матеріали науково-практичної конференції «Студентські читання–2020»*. Житомир: ПНУ, 2020. С. 162–163.

Структура і обсяг роботи. Кваліфікаційна робота включає вступ, три розділи основної частини, загальні висновки, список використаних літературних джерел, викладена на 28 сторінках комп'ютерного тексту.

РОЗДІЛ 1

ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ВИРОБНИЦТВА ТВЕРДОГО СИРУ

1.1 Оцінка технологій виробництва твердого сиру

Твердий сир виготовляють шляхом ферментативного згортання білків попередньо обробленого системами очищення молока. Після цього сирна маса проходить процес дозрівання, якому передують технологічні операції обробки сирного згустку (рис. 1.1) [1, 3, 4].

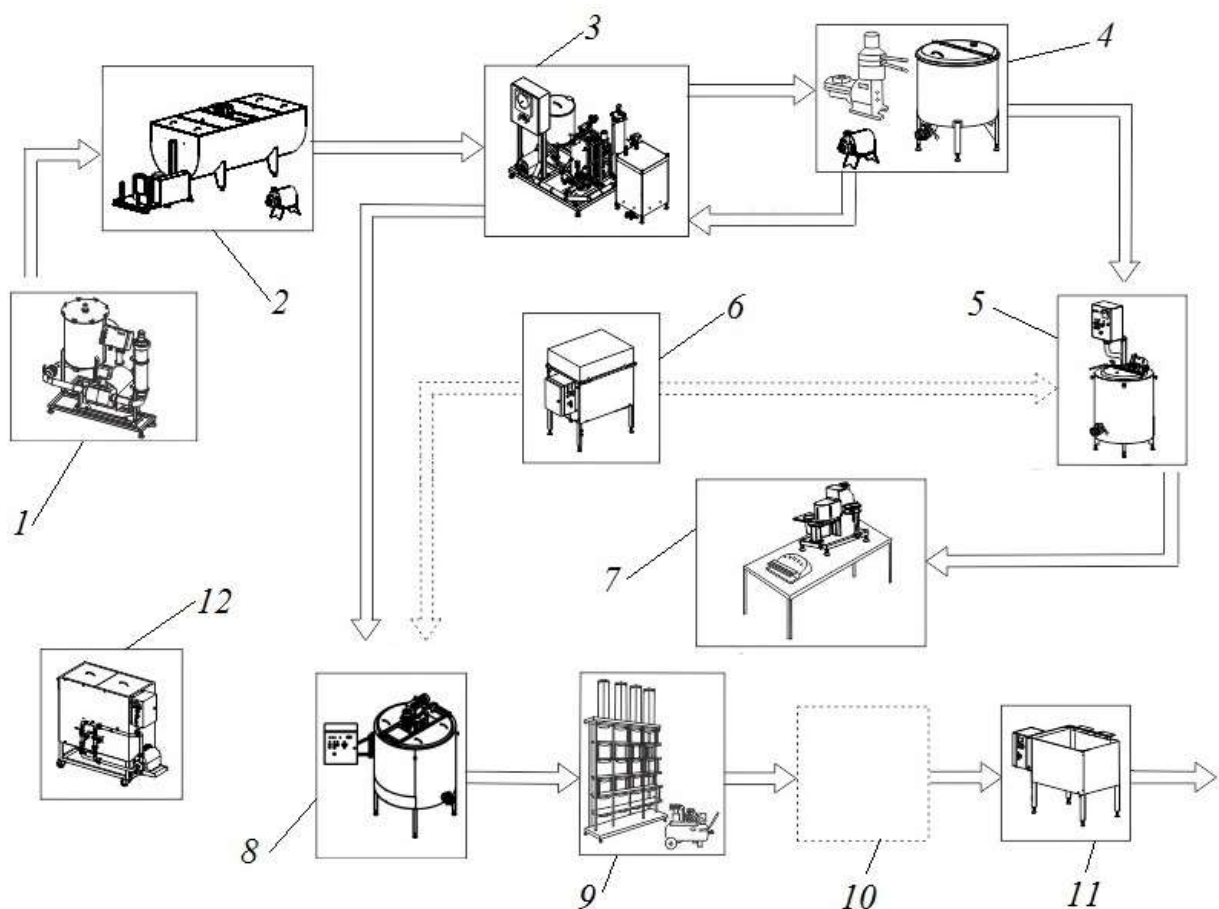


Рис. 1.1. Схема технологічного процесу виробництва сиру: 1 – обладнання для прийому та первинної обробки молока; 2 – місткість для охолодження та зберігання молока; 3 – пастеризація молока; 4 – сепарування молока з відділенням вершків; 5 – пастеризація вершків; 6 – приготування заквасок; 7 – фасування вершків або сметани; 8 – ванна для отримання сирного зерна; 9 – пресування сиру у головки; 10 – соління сиру; 11 – пакування сиру; 12 – обладнання циркуляційного промивання [5].

Технологічний процес (рис. 1.1) відбувається у наступній послідовності. Молоко, яке надходить на переробку спочатку обліковується та відбувається первинне очищення з використанням сепараторів очисників. Далі молоко подається до охолоджувального резервуару де його температура знижується до 4–6 °С, але частина молока (до 25 %) подається на визрівання протягом 12–14 годин при температурі 10–12 °С. Із резервуара для зберігання молоко подається на пастеризаційно-охолоджувальну установку, де підігрівається до температури 35–45 °С для подачі до сепаратора вершковідокремлювача та нормалізатора. Пройшовши нормалізацію, молоко повертається до пастеризаційно-охолоджувальної установки та пастеризується при температурі 72–74 °С та витримується протягом 10–15 с, а у секції для охолодження температуру молока доводять до 32–34 °С для подачі у сировиготовлювач [6, 7, 8].

Одним із процесів за наведеною технологічною схемою є отримання з вершків сметани, для цього використовують пастеризатор (рис. 1.1. поз. 5) та фасувальне устаткування.

Окремо приготовлену закваску додають до пастеризованого нормалізованого молока, при цьому молочна суміш повинна мати кислотність не більше за 20 °Т, а температуру процесу підтримують в межах 30–34 °С. За допомогою сичужного ферменту відбувається згортання молочної суміші протягом 25–30 хв. При цьому отримують молочний згусток [8-11].

Наступною операцією технологічного процесу є розрізання молочного згустку та обробка сирного зерна. Процес обробки триває протягом 25–30 хв до моменту отримання сирного зерна з розміром частинок 7–8 мм. Після цього видаляється до 35 % сироватки та запускається процес вимішування сирного зерна до отримання достатньої пружності. Після вимішування розмір сирного зерна зменшується до 5–6 мм [8-11].

Наступним кроком є процес формування з подальшим самопресуванням, метою якого є видалення надлишку сироватки та ущільнення сирної маси. Під час самопресування, яке триває від 3 до 24 годин, виконують до 5–8

перевертань сформованої сирної маси при температурі 15–20 °С. Процес самоущільнення закінчується із припиненням виділення сироватки [11, 12].

Потім відбувається ступінчате пресування із поступовим збільшенням зусилля притискання для остаточного видалення залишків міжзернової сироватки. Готовий до подальшого процесу сир повинен мати 44–46 % вологи від загальної маси. Із пресувальних форм сир подають до ванни для соління. Соління відбувається протягом 24–36 год при температурі розсолу 8–13 °С, кислотність якого не повинна перевищувати рН 5,2–5,6. Просолений сир витримують протягом двох-трьох діб для просушування при температурі 8–12 °С. Після цього головки сиру відправляють на дозрівання [11, 12].

В процесі визрівання відбуваються мікробіологічні та ферментативні процеси в наслідок яких відбуваються фізико-механічні зміни та властивості сиру, зокрема, смак, запах та консистенція. Процес визрівання може тривати до двох місяців при температурі 0–8 °С і відносній вологості 80–85 %, та до трьох місяців, якщо температура становить 0–4 °С при відносній вологості 85–90 %. Під час визрівання сирні головки підлягають перевертанню кожні 2–3 дні [11, 12].

1.2. Аналіз конструктивно-технологічних схем виготовлювачів сиру

Розглянемо основні типи апаратів періодичної дії закритого типу, що представлені на ринку обладнання для переробної промисловості.

Виготовлювач сирного зерна OST CH-5 (рис. 1.2) фірми Tetra Pak (Швеція) належить до апаратів закритого типу із горизонтальною віссю обертання робочих органів, котрі розташовані у циліндричному корпусі-резервуарі.

Нижня частина резервуара має теплообмінну сорочку до якої передбачено подавання пари або гарячої води для підігрівання молока разом із закваскою. На горизонтальному валу змонтовані перемішу вальні та різальні робочі органи, виконані у вигляді прямокутних корпусних лопатей. При обертанні в

один бік ножі повертаються лезами в напрямку руху та здійснюють розрізання сирного згустку. При обертанні в інший бік ножі будуть взаємодіяти із сирним згустком тупим боком, тому буде відбуватись перемішування розрізаного сирного згустку [14].



Рис. 1.2. Виготовлювач сирного зерна OST CH-5: 1 – комбінований робочий орган; 2 – відбирач сироватки; 3 – електропривод; 4 – термосорочка; 5 – оглядовий люк; 6 – система промивання.

Кожна секція робочого органу складається із металевої рами всередині якої знаходяться поздовжні (радіальні) та поперечні ножі загострені з однієї сторони. Робочі органи на валу розташовані таким чином, щоб мінімізувати зусилля на їх привод. Різний кут установки робочих органів передпачає поступове послідовне їх занурення у сирний згусток, що є позитивним технічним рішенням. Але робочий орган такої конструкції не забезпечує достатню інтенсивність перемішування, хоча досить ефективний при розрізанні сирного згустку [14].

Горизонтальний циліндричний резервуар має обмежений ступінь його заповнення робочою сумішкою, що зменшує експлуатаційну продуктивність

такого обладнання. Окрім цього, може бути проблематичним забезпечення герметичності підшипникових вузлів горизонтального вала, і як наслідок, можливе потрабляння мастильних матеріалів при пошкодженні ущільнень.

Така проблема може бути усунена у виготовлювачів сиру з горизонтальним розташуванням резервуару та вертикальними робочими органами. Наринку представлений сировиготовлювач вітчизняного виробництва модельного ряду Я5-ОСЖ (рис. 1.3) [15, 16].



Рис. 1.3. Виготовлювач сирний Я5-ОСЖ: 1 – комбінований робочий орган; 2 – термоізоляція; 3 – нагрівальна сорочка [16, 17].

Промисловість нашої держави виробляє виготовлювачі сиру Я5-ОСЖ із різною робочою місткістю (від 0,3 до 10 м³), технічна характеристика деяких із них подана у таблиці 1.1. Принцип роботи аналогічний до розглянутого виготовлювача OST СН-5. Відмінність полягає у вертикальній осі приводу робочих органів-інструментів та у формі робочої місткості. Робоча місткість виконана у вигляді поєднаних між собою циліндрів, тобто, утворюється суцільна вертикальна стінка, що нагадує еліпс при співвідношенні сторін 2:1. Всередині місткості встановлено три мішалки, які охоплюють під час роботи всю робочу поверхню продукту. В процесі розрізання сирного згустку мішалки обертаються в один бік, а при вимішуванні сирного зерна – в інший. Нагрівання

продукту відбувається за рахунок подачі пари, таким чином щоб сирний згусток мав динаміку нагріву $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{хв}$. [18, 19, 20].

Таблиця 1.1.

Технічні характеристики виготовлювачів сиру закритого типу

Показник	Модель				
	Я5- ОСЖ1	Я5- ОСЖ3	CDT- 3000	BC3-3	OST CH-5
Робоча місткість, м ³	1	3	3	3	3
Частота обертання робочого інструменту, хв ⁻¹	1,0–18		2,0–10	4,0–23	2,0–10
Витрата пари / гарячої води з інтенсивністю підігріву $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{хв}$., кг/год	-		150	190	300
Встановлена потужність, кВт	0,75	1,5	0,75	2,2	4,0
Габаритні розміри, мм:					
довжина	1860	2510	2660	1900	2395
висота	1420	1710	1760	2600	2510
ширина	1690	2110	2350	-	2200
Маса, кг	550	1560	1360	1350	1150

Український виробник обладнання для харчової промисловості компанія ПП «ТХЛ Палладіум» (м. Тернопіль) пропонує виготовлювачі сиру власної конструкції серії BC3 із робочою місткістю від 1 до 3 м³. Робочим органом даного обладнання є два окремих різально-вимішувальні інструменти для синхронного приводу яких використовується мотор-редуктор та передавальні зубчасті передачі. При обертанні комбінованих інструментів за годинниковою стрілкою відбувається процес різання сирного згустку, а проти – вимішування сирного зерна [21].

Іспанський виробник Technical пропонує на ринку виготовлювачі сиру серії CDT із вертикальним резервуаром місткістю від 2 до 15 м³. Робочий комбінований інструмент має електронно-кероване реверсивне обертання навколо вертикальної осі [22]. Тип корпусу аналогічний до виготовлювачів сиру серії Я5-ОСЖ, відмінність полягає у повністю рівному дні із незначним ухилом, що забезпечує повне вивільнення сирного зерна.

Більшість виготовлювачів сиру із вертикальними місткостями оснащені двома робочими органами комбінованого типу, на відміну від обладнання типу Я5-ОСЖ, що призводить до ускладнення конструкції та збільшення її ваги. Так, виготовлювач Я5-ОСЖ-3 має на 200 кг (15 %) більшу вагу ніж виготовлювач CDT-3000 аналогічної місткості та вдвічі більшу потужність приводу (рис. 1.4).

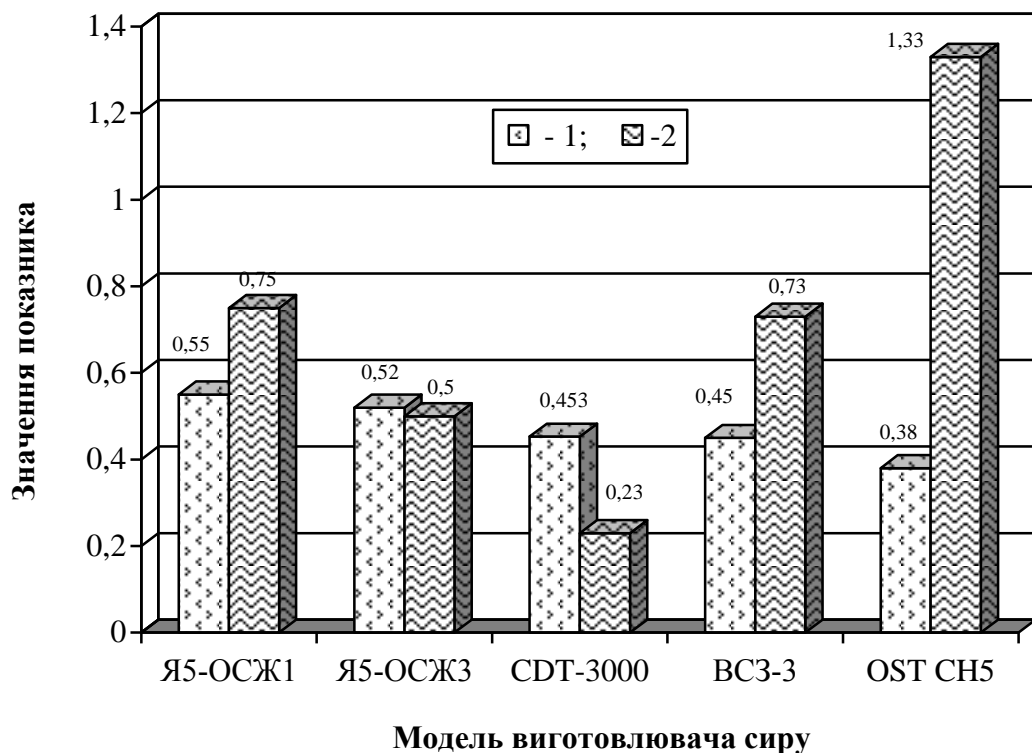


Рис. 1.4. Питомі показники виготовлювачів сиру: 1 – питома матеріаломісткість, кг/л.; 2 – питома енергоємність, кВт×год/м³.

Відповідно до порівняльного графічного аналізу (рис. 1.4) вертикальні виготовлювачі сиру відрізняються за питомими експлуатаційними

показниками. За показником питомої матеріаломісткості виготовлювачі даного типу майже ідентичні. Найменше значення показника притаманне сировиготовлювачу вітчизняного виробництва ВСЗ-3 (0,45 кг/л.), але майже ідентичне із іспанським виготовлювачем СДТ-3000 (0,453 кг/л.) – відмінність лише 0,22 %. В середньому показник питомої матеріаломісткості знаходиться на рівні 0,49 кг/л. За показником питомої енергоємності представлені зразки обладнання мають більш відчутну відмінність. Найменші енерговитрати будуть для сировиготовлювача СДТ-3000, а найвище – для вітчизняного обладнання Я5-ОСЖ1 та ВСЗ-3. Можливо це пов'язано із недостатньою енергоефективністю робочих інструментів, що потребує детального вивчення питання впливу їх конструктивних особливостей на витрати енергії під час технологічного процесу виробництва сирного зерна.

1.3. Висновки по розділу 1

1. Виконаний аналіз виготовлювачів сиру вказав на використання у виробництві обладнання як відкритого так і закритого типів. У зв'язку із необхідністю виконання санітарних вимог, найбільшого поширення набули сировиготовлювачі закритого типу.

2. Дослідження показників роботи виготовлювачів сиру закритого типу вказали на значні переваги за показником питомої енергоємності обладнання із вертикальним типом робочої місткості. Так, показник питомої енергоємності горизонтального виготовлювача на 44 % перевищує значення найбільш енерговитратного вітчизняного обладнання з вертикальним типом робочої місткості. Встановлено, що одним із напрямків зниження енергоємності є удосконалення конструкції комбінованого робочого органу з вертикальною віссю приводу.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЙНОЇ СХЕМИ КОМБІНОВАНОГО РОБОЧОГО ІНСТРУМЕНТУ

2.1. Визначення шляхів удосконалення виготовлювача сиру періодичної дії з вертикальними робочими органами

Проведена нами оцінка вказала на переваги виготовлювачів сиру із вертикальною віссю обертання з вертикальними місткостями. Перевагою такого обладнання є максимально повне використання простору місткості. Іншою, не менш важливою перевагою з точки зору реалізації технологічного процесу є рівномірна товщина робочого згустку по всій площині місткості. В такому випадку робочі органи-інструменти будуть весь час перебувати у зануреному стані, що дозволяє рівномірно впливати на продукт. При цьому привод робочих органів буде мати рівномірне навантаження та працювати з постійним зусиллям [19].

Виготовлювачі сирного зерна із вертикальною циліндричною робочою місткістю мають суттєві переваги за компактністю, порівняно із горизонтальними циліндричними місткостями, тому займають меншу виробничу площу. Але до недоліків такого обладнання відносять достатньо високий рівень продукту, що створює великий перепад висоти згустку під час періодичних видалень сироватки. При цьому знижується ефективність робочого органу-інструменту, який працює у неповністю заповненій місткості. Для вирішення цієї проблеми виробники і запропонували місткості, котрі у формі поєднання двох вертикальних циліндрів, що у горизонтальній площині нагадує еліпс. У такій місткості рівень робочого згустку буде меншим, а інтенсивність використання робочого органу вищою, оскільки не буде суттєвих перепадів сирного згустку за висотою [18, 19, 20].

Недоліком виготовлювачів сиру вертикального типу є недосконалість робочих органів-інструментів. Це проявляється у тому, що сирна маса під час

перемішування (формуванні сирного зерна) не має оптимальної траєкторії переміщення відносно робочого органу – рухається попереду. В наслідок цього збільшується тривалість операції вимішування сирного зерна і, як наслідок, зростають енерговитрати на технологічний процес виробництва твердого сиру в цілому. Принцип роботи комбінованого робочого органу виготовлювача сирного зерна продемонстровано на рис. 2.1 [17].

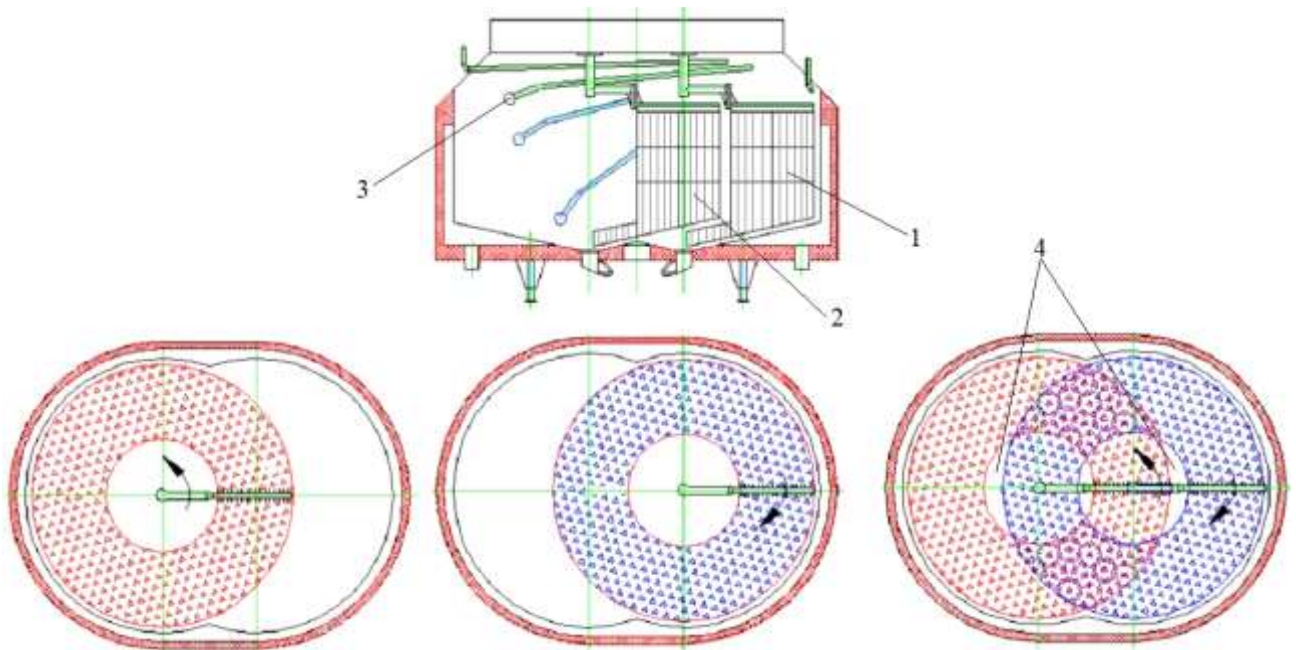


Рис. 2.1. Процес розрізування та вимішування сирного згустку виготовлювача сиру фірми BERTSCH (Австрія): 1, 2 – різально-вимішувальний робочий орган; 3 – пристрій для видалення сироватки; 4 – необроблені робочим органом зони сирного згустку [17].

Два робочих комбінованих різально-вимішувальних робочих органи складаються із рами складної форми та вертикальних та горизонтальних прямолінійних ножів (рис. 2.1). Ножі з одного боку загострені – для процесу розрізання сирного згустку, а з іншого боку заокруглені – для процесу вимішування сирного зерна. Привод робочих органів забезпечує їх обертання у протилежних напрямках під час кожного із двох вказаних процесів. Це дозволяє рівномірно прикладати зусилля до сирного згустку (не збивати в

одному напрямку). Але виникають зони із недостатньою інтенсивністю впливу робочих органів (рис. 2.1), що потребує детального вивчення цього питання.

Таким чином, резервом підвищення ефективності виготовлювача сиру періодичної дії вертикального типу є удосконалення робочого органу у напрямку покращення процесу вимішування сирного зерна [18].

2.2. Встановлення структурно-функціональної схеми робочого органу виготовлювача сиру

Щоб інтенсифікувати процес вимішування сирного зерна необхідно усунути проблему пересування частинок сирного згустку попереду заокругленого боку ножів різально-вимішувального органу. Для цього пропонується удосконалена конструкція ножового полотна комбінованого робочого органу (рис. 2.2).

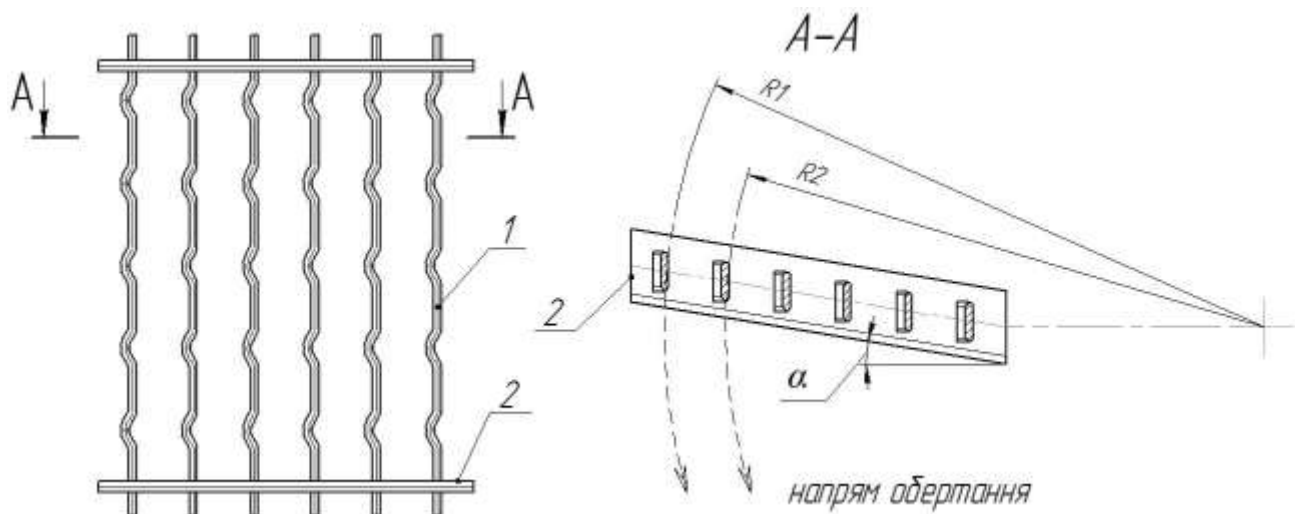


Рис. 2.2. Розроблений різально-вимішувальний робочий орган виготовлювача сиру: 1 – вертикальні ножі; 2 – горизонтальні ножі.

Розроблений робочий орган відрізняється від серійного обладнання формою вертикального ножа. Окрім цього, відповідно до осі обертання (рис.

2.2, розріз А-А), горизонтальний ніж розташований під кутом α . Це дасть змогу інтенсифікувати процес вимішування.

Незважаючи на однакову кутову швидкість обертання робочого інструмента, лінійна швидкість кожного вертикального ножа буде мати свою величину [23]:

$$\begin{aligned}\omega &= 2 \cdot \pi \cdot n, \\ v_i &= \frac{\pi \cdot R_i \cdot n}{60},\end{aligned}\tag{2.1}$$

де ω – кутова швидкість обертання осі робочого органу, рад/с;

n – частота обертання приводу робочого органу, с⁻¹;

v_i – колова швидкість i -того вертикального ножа, м/с;

R_i – радіус обертання i -того вертикального ножа, м.

Конструкція розробленого вертикального ножа має радіальні вигини по його довжині. Таке рішення дозволяє інтенсифікувати процес перемішування за рахунок того, що частинки сирного згустку будуть отримувати бокове прискорення вздовж горизонтального ножа. В такому випадку буде відсутня необроблена зона, як це зображено на рис. 2.1.

2.3. Висновки до розділу 2

1. Встановлено, що резервом підвищення ефективності виготовлювача сиру періодичної дії вертикального типу є удосконалення робочого органу у напрямку покращення процесу вимішування сирного зерна.

2. Розроблена конструкція різально-вимішувального робочого органу із оригінальною формою вертикальних ножів. Присутність радіальних вигинів надає часточкам сирного згустку бокового прискорення, що забезпечує інтенсивніше перемішування сирного зерна.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИМІШУВАННЯ СИРНОГО ЗЕРНА

3.1. Визначення кінематичних параметрів розробленого робочого інструменту

Під час розрізання та вимішування сирного згустку робочий орган спонукає часточки середовища до складного руху. Вимішування має відбуватись за умови найкращого розподілу частинок в усьому об'ємі місткості. Найкраще, коли сирне зерно буде знаходитись у зваженому стані за всією висотою місткості. При цьому концентрація твердофазного середовища буде рівномірною, а швидкість обертання робочого органу має бути обрана виходячи із умови недопущення осідання часточок на дно апарата. Натомість, підвищена швидкість обертання викличе надмірне подрібнення та руйнування сирного згустку, що негативно вплине на якість кінцевого продукту. Тому, необхідно знайти оптимальний режим роботи з врахуванням викладених умов.

Основною умовою статичного обертання робочого органу [23] є сталість кутової обертової швидкості для всіх точок, що приймають участь у процесі, тобто має виконуватись умова $\omega = const$. В такому випадку колову швидкість (v) можна поєднати із радіусом обертання за допомогою рівняння:

$$v = \omega \cdot r, \quad (3.1)$$

де r – радіус обертання, м;

ω – кутова швидкість обертання осі робочого органу, рад/с.

Якщо прийняти умову, що $r \rightarrow 0$, то $v \rightarrow 0$, то біля осі обертання не буде переміщення часток робочого середовища. Ось чому рама робочого комбінованого органу віддалена від дійсної осі обертання (див. рис. 2.2).

Динамічне обертання характеризується умовою, яка вказує, що добуток колової швидкості деякої часточки на радіус обертання має бути постійним в межах заданого об'єму продукту, тобто можна записати:

$$v \cdot r = c = \text{const.} \quad (3.2)$$

Оцінка рівнянь (3.1) та (3.2) дає формулу визначення кутової швидкості обертання робочого органу:

$$\omega = \frac{c}{r^2}; \quad (3.3)$$

Таким чином, за умови динамічного обертання кутова швидкість змінюється обернено пропорційно квадрату відстані частинки від осі обертання.

3.2. Встановлення енергетичних характеристик розробленого різально-вимішувального робочого органу

В процесі функціонування розробленого робочого органу радіальний вигин працює як лопатка з певним радіусом обертання. При цьому на часточку сирного згустку будуть діяти сили, які змушують здійснювати складний рух. Під час вимішування витрачається зусилля на забезпечення переміщення часточки від площини лопатки та подолання сил які чинять опір цьому переміщенню, тобто опору середовища. При цьому береться до уваги гідростатичний тиск викликаний заповненням простору робочим середовищем.

Нехай елемент радіального вигину, який будемо називати лопаткою (рис. 3.1), буде діяти на сирний згусток із силою P . Проекціями даної сили є складова P_c прикладена на вісь обертання та складова P_m , яка називається тангенціальною силою.

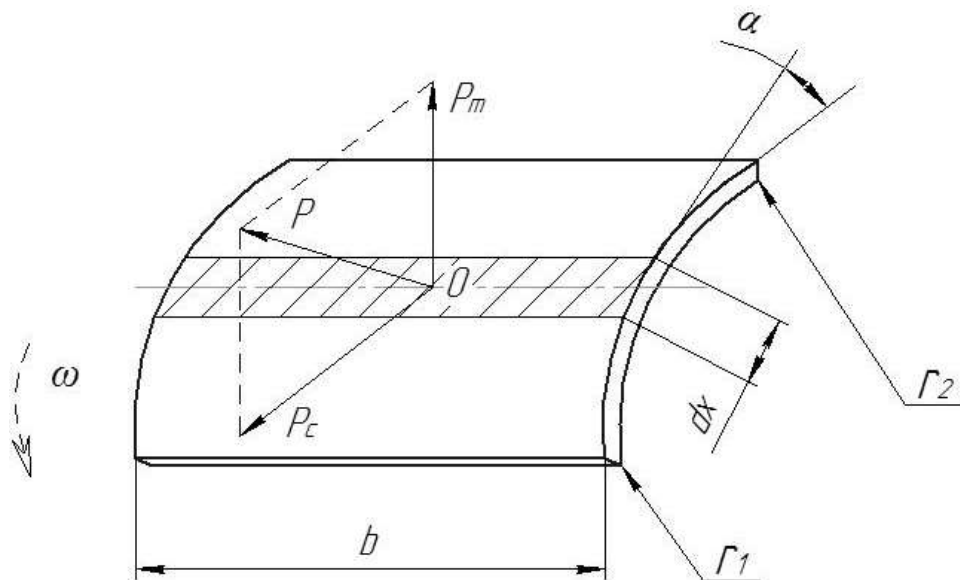


Рис. 3.1. Розрахункова схема дії сил на елемент радіального вигину розробленого робочого органу

Співставимо потоки маси робочого середовища перед та після лопатки. Тоді, імпульс зовнішніх сил, що діють на потік в напрямку початкової швидкості, дорівнює зміні кількості руху потоку. Тоді силу тиску в напрямку осі обертання можна знайти за залежністю:

$$P_c = \Delta l \cdot t \cdot (p_1 - p_2) + \Delta l \cdot t \cdot (\rho_1 \cdot v_1^2 - \rho_2 \cdot v_2^2), \quad (3.4)$$

де ρ_1, ρ_2 – густина середовища перед та після проходження лопатки через сирний згусток, кг/м^3 ;

p_1, p_2 – тиск у перерізі перед лопаткою та за лопаткою, Па;

t – періодичність радіальних вигинів, м;

Δl – довжина лопатки, м;

v_1, v_2 – швидкість переміщення маси перед та після лопатки в напрямку дії осьової сили, м/с.

Відповідно до рівняння нерозривності потоку [24] відомо, що $\rho_1 = \rho_2$ та $v_1 = v_2$, тому рівняння (3.4) отримає вигляд:

$$P_c = \Delta l \cdot t \cdot (p_2 - p_1). \quad (3.5)$$

Таким чином, осьова складова сили тиску витрачається на підвищення тиску, відповідно до рівняння (3.5). Для знаходження тангенціальною складовою сили тиску P_m , скористаємось рівнянням імпульсу руху [23, 24], аналогічно до рівняння (3.4), запишемо:

$$P_m = \Delta l \cdot t \cdot v_1 \cdot (v_{1m} - v_{2m}), \quad (3.6)$$

де v_{1m} , v_{2m} – швидкість переміщення маси перед та після лопатки в напрямку дії тангенціальної сили, м/с.

Рівняння (3.6) не враховує розташування лопатки відносно оброблюваного середовища та її параметри. Виходячи з теорії обтікання рідиною тіла робочого органу, для визначення зусиль, діючих на радіальний вигин (лопатку), який розташований під кутом α до напрямку обертання, опір середовища тангенціальній силі можна визначити за допомогою формули Ньютона-Кармана [24]:

$$P_m = \rho \cdot v^2 \cdot S \cdot \sin \alpha, \quad (3.7)$$

де ρ – густина оброблюваного середовища, кг/м³;

v – колова швидкість, м/с;

S – площа поверхні радіального вигину, м²;

α – кут нахилу радіального вигину до напрямку руху, град.

Під час свого руху лопатка зміщує за одиницю часу об'єм середовища рівний $S \times v$ та надає йому кількість руху, яка визначається як добуток маси на швидкість $\rho \times v$. Елементарна поверхня лопатки записується як $dS = b \cdot dx$ (рис. 3.1). З урахуванням того, що $v = \omega \cdot x$, рівняння (3.7) отримає вигляд:

$$dP_m = c \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot b \cdot \sin \alpha \cdot x^2 dx \quad (3.8)$$

де c – коефіцієнт опору переміщення, приймається $c=0,44$ [23, 24];

b – ширина робочого органу (вертикального ножа), м.

Виконаємо інтегрування рівняння (3.8) з врахуванням межі радіального вигину r_1, r_2 , отримаємо силу тиску на всю лопать:

$$P_m = c \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot b \cdot \sin \alpha \cdot \int_{r_1}^{r_2} x^2 dx.$$

отримаємо:

$$P_m = \frac{1}{3} c \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot b \cdot (r_2^3 - r_1^3) \cdot \sin \alpha. \quad (3.9)$$

де r_1, r_2 – радіуси обертання радіального вигину в передній та задній площині, м.

Результуюча сили тиску визначається складанням сил P_c і P_m :

$$P = \sqrt{P_c + P_m}. \quad (3.10)$$

Потужність, що йде на обертання лопаті визначиться з виразу, Вт:

$$N = P \cdot \omega \cdot x_0 \cdot k \cdot z, \quad (3.11)$$

де k – кількість радіальних вигинів одного вертикального ножа, шт.;

z – кількість ножів одного робочого органу, котрі приймають участь у технологічному процесі виготовлення сирного зерна, шт.;

x_0 – координата прикладання сили P_m , яка знаходиться на відстані $2/3$ від ширини ножа (b) вздовж осі прикладених сил обертання (рис. 3.1):

$$x_0 = \frac{3}{4} \cdot \frac{r_2^4 - r_1^4}{r_2^3 - r_1^3} \quad (3.12)$$

Для спрощення обрахунків, радіуси обертання передньої та задньої площини взаємодії із робочим середовищем можна прийняти рівним геометричному радіусу R_i кожного ножа відносно центру обертання

комбінованого робочого органу (див. рис. 2.2).

Таким чином, для визначення потужності, необхідної на вимішування сирного зерна, слід визначити потужність, витрачену кожним профілем з відповідним кутом нахилу до площини обертання α і радіусами r_1, r_2 . При цьому, необхідно врахувати і кількість радіальних вигинів на одному ножі.

Потужність, яка необхідна на привод розробленого різально-вимішувального робочого органу виготовлювача сиру має враховувати збільшення потужності на подолання втрат енергії у вузлах тертя, Вт:

$$N_e = 1,15 \cdot N \cdot i, \quad (3.13)$$

де i – кількість робочих органів, котрі має виготовлення сирного зерна періодичної дії, шт.;

1,15 – коефіцієнт збільшення потужності на привод робочих органів виготовлювача сирного зерна [23].

На підставі теоретичного аналізу та результатів дослідів можна зробити висновок, що потужність, споживана сировиготовлювачах періодичної дії даного конструктивного типу залежить від наступних параметрів: фізичних – густина сирного згустку ρ , кг/м³; кінематичних – частота обертання n , с⁻¹; геометричних – параметри робочого інструменту (ширина та висота), м.

Енергоємність виробництва сирного зерна (рис. 3.2) визначається за формулою, Вт×год/кг:

$$E = \frac{N_e}{Q}, \quad (3.14)$$

де Q – продуктивність виготовлювача сиру, кг/год:

$$Q = \frac{V \cdot \rho \cdot B}{t}, \quad (3.15)$$

де V – робочий об'єм виготовлювача сиру, м³;

B – вихід сирного зерна із маси сирного згустку;

t – тривалість обробки сирного зерна, год.

За результатами досліджень отримали рівняння регресії енергоємності виробництва сирного зерна розробленим робочим органом (рис. 3.2):

$$E = 0,00002 \cdot n^2 + 0,0007 \cdot n + 0,255. \quad (3.16)$$

Отримана математична модель (3.16) адекватно описує взаємозв'язок досліджуваних факторів, оскільки має місце досить високе значення коефіцієнта множинної кореляції на рівні $R=0,977$.

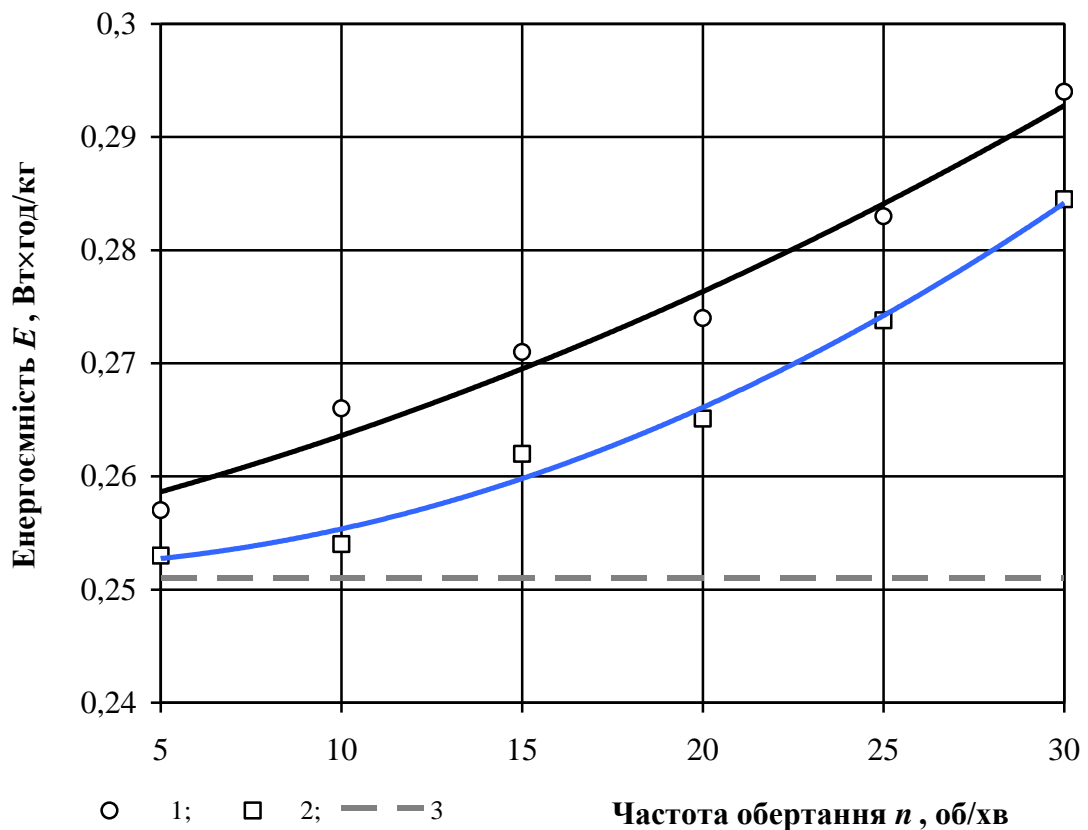


Рис. 3.2. Залежність енергоємності виробництва від частоти обертання робочого органу за умови виходу сирного зерна: 1 – 60 %; 2 – 64 %; 3 – енергоємність серійного виготовлювача CDT-3000.

Аналіз графічних залежностей (рис. 3.2) вказує на зростання енергоємності виробництва зі збільшенням частоти обертання робочого органу незалежно від виходу сирного зерна. За умови вищого виходу сирного зерна (64

%) енергоємність процесу знижується в середньому на 3 % незалежно від частоти обертання робочого органу. Це можна пояснити зростанням продуктивності виготовлювача за рахунок збільшення виходу сирного зерна (рівняння (3.15)) при незмінній тривалості процесу 0,5 год. Порівняно із прямолінійними ножами робочого органу прототипу, енергоємність процесу із новими робочими органами зростає від 0,8 до 5,6 % при зміні частоти обертання від 5 до 20 об/хв., за умови виходу сирного зерна на рівні 64 %.

3.3 Висновки до розділу 3

1. Отримано математичні вирази, котрі дозволяють визначити силу тиску на профіль розробленого робочого органу механізму вимішування сирного зерна, встановлено залежності для визначення потужності яка необхідна для приводу робочих інструментів із удосконаленими вертикальними ножами з радіальними вигинами вздовж леза. За результатами досліджень отримане рівняння регресії, котре пов'язує енергоємність виробництва та частоту обертання робочого органу сировиготовлювача.

2. Запропоновані удосконалення робочого органу дозволяють усунути проблему присутності необроблених ділянок сирного згустку. Це відбувається за рахунок надання частинці продукту бокової сили переміщення в напрямку від осі обертання. В наслідок додаткових зусиль надання певного прискорення часточкам сирного згустку, зростає потужність і, як наслідок, енергоємність процесу на 0,8–5,6 % при частоті обертання 5–20 об/хв., за умови виходу сирного зерна на рівні 64 %.

ВИСНОВКИ

1. Виконаний аналіз виготовлювачів сиру вказав на використання у виробництві обладнання як відкритого так і закритого типів. Дослідження показників роботи виготовлювачів сиру закритого типу вказали на значні переваги за показником питомої енергоємності обладнання із вертикальним типом робочої місткості. Встановлено, що одним із напрямків зниження енергоємності процесу є удосконалення конструкції комбінованого робочого органу з вертикальною віссю приводу у напрямку покращення процесу вимішування сирного зерна.

2. Розроблена конструкція різально-вимішувального робочого органу із оригінальною формою вертикальних ножів. Присутність радіальних вигинів надає часточкам сирного згустку бокового прискорення, що забезпечує інтенсивніше перемішування сирного зерна. Розміщення робочого інструменту під кутом до осі обертання сприятиме усуненню проблеми можливого передчасного сповільнення часточок у міжножевому просторі.

3. Отримано математичні залежності, котрі дозволяють визначити силу тиску на профіль розробленого робочого органу механізму вимішування сирного зерна, встановлено залежності для визначення потужності яка необхідна для приводу робочих інструментів із удосконаленими вертикальними ножами з радіальними вигинами вздовж леза. За результатами досліджень отримане рівняння регресії, котре пов'язує енергоємність виробництва та частоту обертання робочого органу сировиготовлювача.

4. Запропоновані удосконалення робочого органу дозволяють усунути проблему присутності необроблених ділянок сирного згустку. Це відбувається за рахунок надання частинці продукту бокової сили переміщення в напрямку від осі обертання. В наслідок додаткових зусиль надання певного прискорення часточкам сирного згустку, зростає потужність і, як наслідок, енергоємність процесу зростає на 0,8–5,6 % при частоті обертання 5–20 об/хв., за умови виходу сирного зерна на рівні 64 %.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Механічні процеси і обладнання переробного та харчового виробництва / П. С. Берник, З. А. Стоцько, І. П. Паламарчук, І. А. Зозуляк. Львів: Видавництво НУ Львівська політехніка, 2004. 336 с.
2. Гудков А. В. Сыроделие: технологические, биологические и физико-химические аспекты. М., ДеЛи принт, 2004. 804 с.
3. Галат Б. Ф., Гриненко В. І., Зміїв В. В. Молоко: виробництво та переробка / за ред. Б. Ф. Галат. Харків, 2005. 352 с.
4. Олійник А. С. Оцінка технологічної ефективності виробництва сиру. *Матеріали науково-практичної конференції «Студентські читання–2020»*. Житомир: ПНУ, 2020. С. 162–163.
5. Галат Б. Ф., Машкин Н. И., Козач Л. Г. Справочник по технологии молока. Киев : Урожай, 1990. 352 с.
6. Єресько Г. О., Шинкарик М. М., Ворощук В. Я. Технологічне обладнання молочних виробництв. Київ: фірма «ІНКОС», 2007. 337 с.
7. Закалов О. В., Закалов І. О. Проектування підприємств харчової промисловості. Тернопіль : Видавництво ТДТУ, 2007. 262 с.
8. Закалов О. В., Бортник А. І. Розрахунок типових робочих органів технологічного обладнання харчових виробництв. Тернопіль : Видавництво ТДТУ, 2005. 105 с.
9. Дідух Н. А., Молокопой Л. О. Високоєфективні режими теплової обробки у виробництві твердих сичужних сирів функціонального призначення. *Молочное дело*. 2008. № 6 (49). С. 37–39
10. Дідух Н. А., Чагаровський О. П., Лисогор Т. А. Заквашувальні композиції для виробництва молочних продуктів функціонального призначення: монографія. Одеса : Видавництво «Поліграф», 2008. 236 с.
11. Капрельянц Л. В., Іоргачова К. Г. Функціональні продукти : монографія. Одеса: Друк, 2003. 312 с.
12. Закалов О. В., Закалов І. О. Технологічне обладнання харчових виробництв. Тернопіль : Видавництво ТДТУ, 2000. 406 с.

13. Технологічне обладнання для переробки продукції тваринництва / О. В. Гвоздєв, Ф. Ю. Ялпачик, Ю. П. Рогач, Л. М. Кюрчева. Суми: Довкілля, 2004. 420 с.
14. Tetra Pak Cheese Vat OST CH5 Horizontal vat for curd making : веб-сайт. URL : <https://www.tetrapak.com/solutions/processing/main-technology-area/curd-making/cheese-vat-ost-ch5>
15. Гулий І. С. Обладнання підприємств переробної і харчової промисловості. Вінниця: Нова книга, 2001. 575 с.
16. Дацишин О. В., Ткачук А. І., Чубов Д. С. Машина та обладнання переробних виробництв. К.: Вищ. освіта, 2005. 159 с.
17. Апарати для вироблення сирного зерна. : веб-сайт. URL : <https://docplayer.net/92360898-Aparati-dlya-viroblennya-sirnogo-zerna.html>.
18. Олійник А. С. Аналіз робочих органів виготовлювачів сиру. *Матеріали науково-практичної конференції «Студентські читання–2020»*. Житомир: ПНУ, 2020. С. 94–95.
19. Малежик І. Ф. Процеси та апарати харчових виробництв. К.: НУХТ, 2003. 400 с.
20. Олійник А. С. Оцінка виготовлювачів сирного зерна. *Матеріали науково-практичної конференції «Наукові читання–2020»*. Житомир: ЖНАЕУ, 2020. С. 214–215.
21. Сировиготовлювач закритого типу. : веб-сайт. URL : <http://www.palladium-milk.com.ua/ukr/catalog/oborudovanie-tverdyj-syr/syroizgotovitel/>
22. Машина для виробництва сиру CDT. : веб-сайт. URL : <http://silence.ua/syroizgotovitel-cdt.html>
23. Розрахунки обладнання підприємств переробної і харчової промисловості : навчальний посібник / Мирончук В. Г., Орлов Л. О., Українець А. І. та ін. Вінниця: Нова книга, 2004. 288 с.
24. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа : учебник; 7-е изд., испр. М. : Дрофа, 2003. 840 с.