

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

кваліфікаційна робота
на правах рукопису

УДК 664.653

КОШМАН Михайло Сергійович

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА РЕЖИМІВ РОБОТИ
ЗМІШУВАЧА РІДКИХ КОМПОНЕНТІВ**

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., доц. Медведський О.В.

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Кошман М. С. Обґрунтування параметрів та режимів роботи змішувача рідких компонентів. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістр зі спеціальності 208 – агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2025 р.

Кваліфікаційна робота спрямована на вирішення наукового завдання підвищення ефективності отримання рідких сумішок у хлібопекарському виробництві шляхом удосконалення змішувального обладнання.

Виконано аналіз відомих конструкцій змішувачів, розроблена конструкція робочого органу змішувача компонентів роторного типу, отримані аналітичні математичні залежності встановлення основних технологічних та кінематичних параметрів розробленого робочого органу.

За результатами досліджень отримали рівняння регресії, які дозволяють оцінити витрати потужності на привод робочого органу за різної частоти обертання відповідно до діаметра ротора, встановлено раціональні кінематичні та конструкційні параметри розробленого ротора, виконана оцінка експлуатаційної ефективності розробленого змішувача.

Ключові слова: змішувач опари, потужність приводу, питома енергія, тривалість процесу

ANNOTATION

Koshman M. S. Justification of parameters and operating modes of a liquid component mixer. – Qualification work in the form of a manuscript.

Qualification work for a master's degree in specialty 208 – agroengineering. – Polissia National University, Zhytomyr, 2025.

The thesis aims to solve the scientific problem of improving the efficiency of obtaining liquid mixtures in bread baking by improving mixing equipment.

An analysis of known mixer designs was performed, a design for a rotary-type component mixer working body was developed, and analytical mathematical dependencies for establishing the main technological and kinematic parameters of the developed working body were obtained.

Based on the research results, regression equations were obtained that allow estimating the power consumption of the working body drive at different rotation frequencies according to the rotor diameter, rational kinematic and design parameters of the developed rotor were established, and the operational efficiency of the developed mixer was assessed.

Key words: mash mixer, drive power, specific energy, process duration

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ВІДОМИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ОТРИМАННЯ РІДКИХ СУМІШОК	7
1.1. Оцінка технологій приготування рідких сумішок	7
1.2. Аналіз технічних засобів змішувачів компонентів рідких сумішок	9
Висновки до розділу 1	14
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАТМЕТРІВ ПЕРЕМІШУВАЧА РІДКИХ КОМПОНЕНТІВ	15
2.1. Моделювання робочого органу змішувача рідких компонентів	15
2.2. Встановлення теоретичних передумов функціонування розробленого змішувача	18
Висновки до розділу 2	22
РОЗДІЛ 3. ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБЛЕНОГО ПЕРЕМІШУВАЧА РІДКИХ КОМПОНЕНТІВ	23
3.1. Встановлення впливу конструкційних та кінематичних параметрів розробленого змішувача на енергетичні показники процесу	23
3.2. Визначення експлуатаційної ефективності отримання рідких сумішок	28
Висновки до розділу 3	30
ВИСНОВКИ	32
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	34

ВСТУП

Актуальність теми. Важливою технологічною операцією, особливо у галузі харчового виробництва, є отримання однорідних за своєю структурою сумішок різноманітних компонентів. Приготуванню сумішок зволжених або навіть кашоподібних вченими приділялось досить багато уваги. Розроблено та обґрунтовано досить велику множину конструкцій та запропоновано конструкційних рішень робочих процесі та робочих органів машин. Проте, для отримання рідких сумішок у хлібопекарському виробництві приділялось недостатньо уваги.

Отримання опарного способу виробництва хлібобулочних виробів передбачає попереднього приготування рідкої сумішки. Приготовлена рідка сумішка, в подальшому технологічному процесі приймає участь у приготуванні тіста. Такий спосіб виробництва тіста для хлібобулочних виробів вважається більш прийнятним, оскільки готовий продукт можна отримати вищої якості. Окрім цього, деякі види хлібобулочних виробів не можуть обійтися від попередньо приготовленої опарки у формі рідкій.

Відомі на ринку обладнання для харчової промисловості змішувачі для отримання рідких сумішей мають досить просте конструкційне виконання. Отримана сумішка рідка із компонентів не відповідає вимогам до її якості. В наслідок цього витрачається більше часу на замішування тіста, його подальшого вистоювання та формування виробу. Підвищити ефективність отримання рідких опарних сумішок у хлібопекарському виробництві вимагає пошуку кращого способу перемішувача. Одним із напрямків інтенсифікації отримання рідких сумішок є створення інтенсивніших змінних за напрямом потоків рідини за рахунок використання конструкцій перемішувачів роторного типу, а не лопатевих робочих органів які формують однорідні потоки.

Таким чином, розроблення ефективного технологічного процесу перемішування із отриманням рідких сумішок різних компонентів розчинених у воді вимагає додаткових теоретичних та експериментальних досліджень для умов харчового виробництва є актуальним та своєчасним завданням.

Мета роботи – підвищення ефективності технологічного процесу виробництва рідких сумішей шляхом обґрунтування конструкційних та технологічних параметрів перемішувача роторного типу.

Відповідно до поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- оцінити технології та технологічне обладнання для виробництва рідких сумішок;
- визначити раціональну конструкцію перемішувального робочого органу роторного типу;
- провести теоретичні дослідження технологічних параметрів процесу перемішування компонентів рідких сумішок;
- визначити раціональні конструкційні та технологічні параметри розробленого змішувача рідких компонентів;
- встановити експлуатаційні показники ефективності використання розробки.

Об’єкт досліджень – процес об’ємного перемішування компонентів рідкої сумішки.

Предмет досліджень – конструкційні та технологічні параметри роторного перемішувача рідких сумішей.

Методи дослідження. Під час дослідження використовувались методи математичної моделювань, та лабораторних випробовувань. Математичні моделювання використовували для отримання моделей переміщення компонентів рідкої сумішки під час роботи розробленого робочого органу, встановлення правильності передумов покращення конструкційних параметрів. Лабораторні випробовування використовувались для перевірки правильності викладу теоретичних позицій, встановлення раціональних параметрів роторної конструкції робочого органу. Всі дослідні дані оброблялись у комп’ютерній програмі Excel.

Апробація результатів роботи. Всі отримані результати під час досліджень апробовані на науково-практичних конференціях, викладені у працях:

1. Кошман М. С. Оцінка способів та технічних засобів перемішування компонентів у харчовій промисловості. *Наукові читання – 2025* : збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками I-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 23 квітня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. Т. 2. С. 13-15.

2. Кошман М. С. Характеристика технологічного процесу приготування тіста. *Студентські читання–2025* : матеріали науково-практичної конференції науково педагогічних працівників та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики. 30 жовтня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. С. 15–17.

3. Кошман М. С. Вплив форми робочого органу на ефективність змішування рідких компонентів. *Біоенергетичні системи* : матеріали ІХ міжнародної науково практичної конференції. 19-20 листопада 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. С. 9–11.

Структура та обсяг роботи. Робота кваліфікаційна виконана державною мовою, складається із вступу, трьох основних розділи з висновками, загальних висновків по роботі, списку літературних джерел. Текст роботи загальним обсягом складає 35 сторінки друку машинного, доповнено 2 таблиці та проілюстровано 17 рисунками та графіками.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ВІДОМИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ

ОТРИМАННЯ РІДКИХ СУМІШОК

1.1. Оцінка технологій приготування рідких сумішок

В харчовій промисловості виробництво рідких сумішок використовується для отримання багатьох продуктів. Найбільш поширеним продуктом у рідкому вигляді є опарка, яка використовується для замішування тіста для виробництва хлібобулочних виробів. Використовується опарковий та безопарковий спосіб виробництва тісного відмінність між якими подана на рис. 1.1. [1, 2]

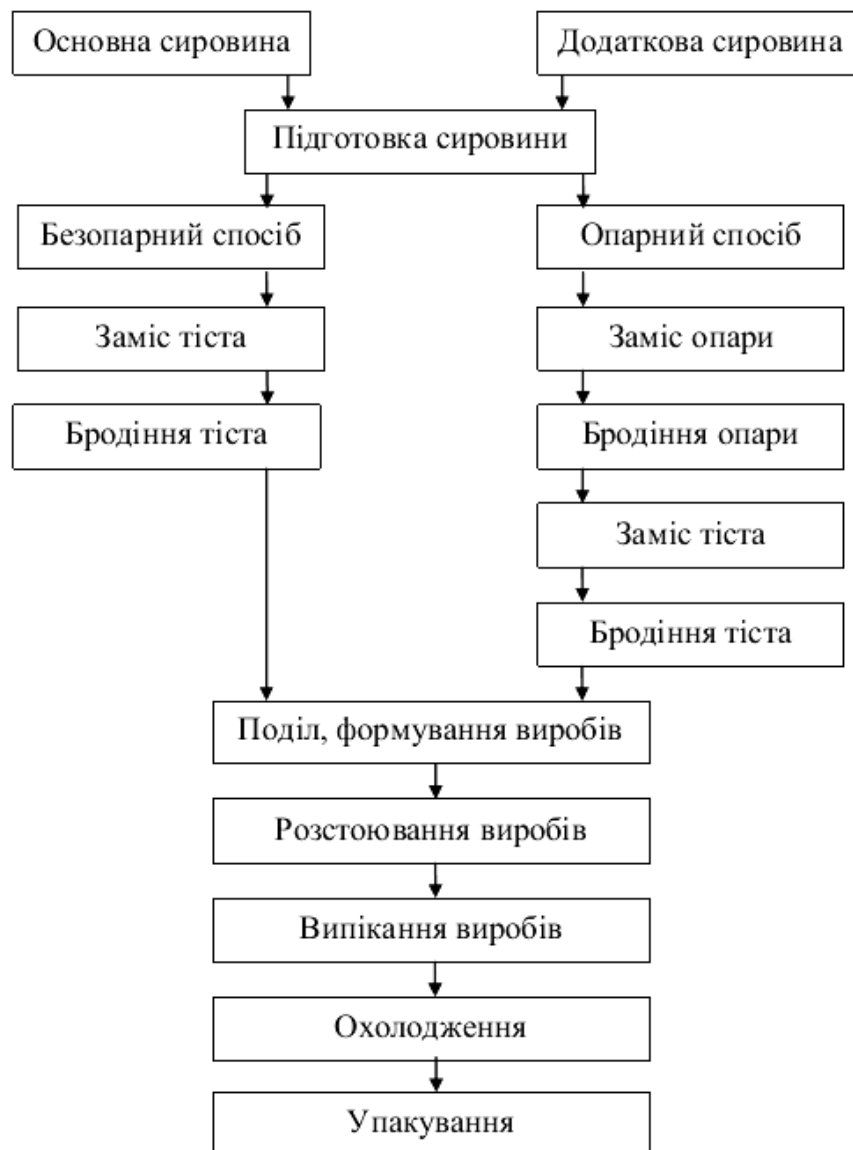


Рис. 1.1. Структурна схема виробництва хлібобулочних виробів.

Приготування рідкої закваски вимагає використання додаткового технологічного обладнання та потребує додаткових витрат часу (рис. 1.2). Проте використання рідких заквасок у приготуванні тіста має ряд переваг порівняно із безпосереднім замішуванням використовуючи обладнання різного типу. [1, 2]

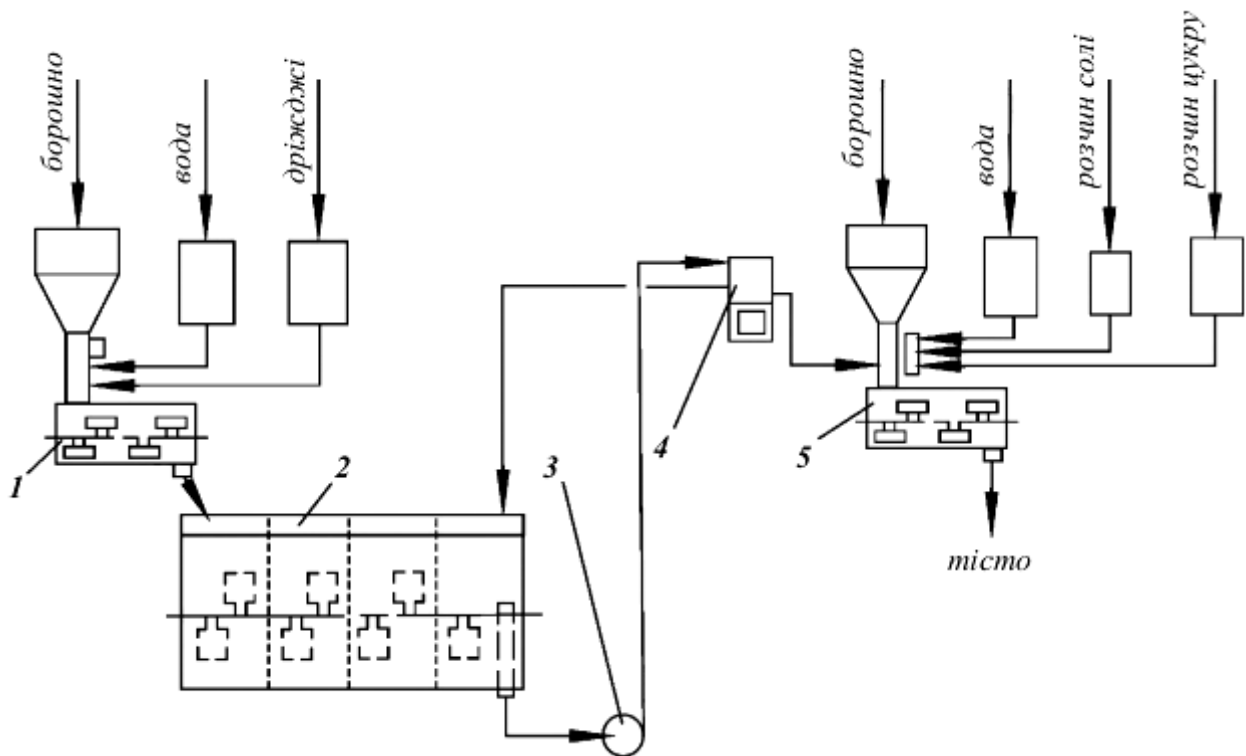


Рис. 1.2. Технологічна схема виробництва тіста із використанням рідких заквасок: 1 – змішувач компонентів; 2 – обладнання для бродіння; 3 – помпа; 4 – місткість проміжна керуюча; 5 – машина для замісу тіста.

Серед переваг використання під час приготування тіста рідких заквасок є отримання продукту вищої якості. Краща якість прослідковується у продовженні терміну зберігання хліба у м'якому вигляді порівняно із безопарним способом. Це пояснюється тим, що за температури 10-14°C спостерігається процес зупинення активностей, тобто створюється процес який можна назвати консервуванням. Відбувається черствіння із значно меншою швидкістю. Такого явища не спостерігається при безпосередньому замішуванні тіста при використанні таких самих компонентів у такі й же кількості. Тому використання способу опаркового можна вважати більш

прийнятним у виробництвах де потрібно отримати готовий продукт зі збільшеним терміном зберігання. [2, 3]

Рідка закваска має бути якісно приготовленою. Вчені відзначають вплив механічний робочих органів на отримання якісної опарної рідкої суміші. Так, під час змішування компонентів перемішувачами різних конструкцій відбувається накопичення повітря що призводить до утворення бульок які будуть визначати можливі центри формування найбільш м'якої частини хлібобулочних виробів. Завдяки впливу робочих органів на компоненти опарної сумішки відбувається розкриття потенціалу клейковини. Відомо, що клейковина визначає кінцеву якість хлібобулочних виробів. Тому використання якісних змішувачів компонентів у рідкій суміщі досить важливий момент та потребує аналізу серійних технічних засобів та оцінки їх роботи. [3]

1.2. Аналіз технічних засобів змішувачів компонентів рідких сумішок

Незважаючи на різноманіття конструкційних рішень змішувачів до кінця невирішеним залишається питання, а який же тип робочих механізмів найбільш підходить для отримання рідких сумішок із набором компонентів.

Для цього проаналізуємо класифікаційні ознаки робочих механізмів, та визначимо основні завдання під час змішування: [4]

- перерозподіл неоднорідних фа між собою рівномірно в заданому об'ємі;
- запобігання розшаруванню та збереження однорідності по всьому об'єму;
- доведення суміші до стану емульсійного та суспензійного;
- забезпечення температурного впливу у заданих межах;
- створення умов для внутрішніх обмінних процесів;
- використання способів інтенсифікації процесів із використанням біологічних чи хімічних доповнювачів).

Змішуванням компонентів у однорідну сумішку називають технологічний процес який полягає у взаємному пересувні і перерозподілі часточок компонентів одного продукту в іншому створюючи рівномірне розподілення у займаному об'ємі.

Змішування компонентів з водою може бути: [4]

- пневматичним;
- циркуляційним;
- статичним;
- механічним;
- проточним.

Найбільш поширеним є звичайне механічне змішування компонентів із водою. Для цього в якості робочих органів використовують лопатки, пропелери та турбовані пристрої. Окрім цього можуть використовуватись робочі органи специфічної форми.

Обладнання для виробництва рідкої опари Tradilevain (рис. 1.3) з модельним рядом TL40, TL 110 та TL 270 (табл. 1.1) фірми JAC (Бельгія) дозволяє автоматично виконувати технологічний процес залежно від закладених у програмі вимог. [5]



Рис. 1.3. Виготовлювач рідкої опари типу Tradilevain

Технічні дані виготовлювача опари типу TL [5]

Показник	Марка машини		
	TL-40	TL-110	TL-270
Потужність двигуна, кВт	1,5	4	7
Теплова потужність, кВт	0,27	0,45	0,75
Потужність холодильного агрегату 50 гц, кВт	0,4	0,9	1,4
Висота завантаження, см	112	125	136
Об'єм бака, л	80	220	540
Максимальний загальний об'єм, л	50	140	340
Максимальний корисний об'єм, л	40	110	270
Мінімальний корисний об'єм, л	20	55	136
Габаритні розміри, мм			
висота	1295	1425	1560
ширина	570	680	980
глибина	950	1100	1460
Вага, кг	145	205	325

Робочий орган виконаний у вигляді чотирилопатевої мішалки. За рахунок зігнутих під певним кутом крило видних лопатей протилежно спрямованих створюється своєрідна геометрія потоків рідини під час перемішування. Відбувається перехресний тік, що сприяє підвищенню ефективності змішування види із компонентами.

Проте під час обертання в центральній частині може формуватись сліпа зона, тобто місце де не відбувається процес змішування. Робочий орган такого типу не може повністю задовольнити виробництво сумішок рідких усіх можливих консистенцій. Зокрема не в змозі отримати рівномірні суспензії.

Для виробництва житнього хліба використовують двофазну технології приготування тіста. При цьому використовують густі закваски, приготування

яких здійснюється у машинах відмінних від тих котрі готують рідкі опари (рис. 1.4). [6, 7]



Рис. 1.4. Машина для приготування густої опари ХЗ-2М-300

Робочий змішувальний робочий орган виконаний у формі лопаток які закріплені на валу у формі гвинтової лінії. Такого типу робочий орган дозволяє отримати суміші кашоподібної густої консистенціїю особливо така технологія підходить для виробництва житнього хліба. Таку опару зручно використовувати, її можна розділити на частини, потім розчинити у воді і додавати до тістомісильного обладнання для приготування житнього тіста.

Проте обмежене використання не дозволяє використовувати такого типу обладнання для приготування сумішок для відмінних потреб. В нашому

випадку до розгляду будемо приймати обладнання для приготування рідкої опари, оскільки відзначається своєю універсальністю.

Обладнання для отримання рідких сумішей, в тому числі і для приготування рідких опар виробляє фірма Sinmag (рис. 1.5).



Рис. 1.5. Обладнання для змішування рідких сумішок модельного ряду SPL2 фірми SINMAG (Китай). [6]

Використання робочого органу у вигляді порожнистої рамки створює свої переваги під час перемішування порівняно із робочими органами у формі звичайних лопатей. Це пояснюється тим, що зігнута під певним кутом рамка забезпечує формування декількох поточків рідкої маси які взаємодіють між собою.

Загальні технічні дані обладнання наведено в таблиці 1.2.

Технічні дані виготовлювача опари типу SPL2 [6]

Показник	Марка машини		
	SPL2-80	SPL2-150	SPL2-300
Потужність двигуна, кВт	1,0	1,0	1,5
Об'єм бака, л	80	150	300
Габаритні розміри, мм			
висота	1440	1455	1560
ширина	955	920	980
глибина	840	1065	1460
Вага, кг	180	230	290

Незважаючи на різноманітність обладнання, робочі органи не в змозі забезпечити змішування компонентів до однорідної суспензії, що дуже важливо для подальшого виробництва тіста для хлібобулочних виробів.

Висновки до розділу 1

1. Важливим технологічним процесом у системі виробництва хлібобулочних виробів є отримання тіста із заданими якісними характеристиками. При виготовленні тіста використовують однофазну та багатофазну технології. За твердженням технологів багатофазна технологія дозволяє отримати продукт значно вищої якості та із подовженим терміном зберігання. Основним компонентом у виробництві тіста є опара, якість якої визначає якість отриманого тіста.

2. Для виробництва опари промисловість пропонує обладнання як для рідкої так і для густої опари. Рідка опара більш універсальний продукт, а густа використовується для виробництва житнього хліба. Наявне технологічне обладнання для виробництва опари рідкої не задовольняє технологів за якістю змішування до однорідного стану маси за об'ємом.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПЕРЕМІШУВАЧА РІДКИХ КОМПОНЕНТІВ

2.1. Моделювання робочого органу змішувача рідких компонентів

Для створення раціональної конструкції нового робочого органу для змішування компонентів із водою врахуємо позитивні ознаки відомих конструкційних рішень. Тому, за основу візьмемо здатність робочого органу створювати пульсуючі потоки які забезпечують процес інтенсифікації перемішування компонентів. Окрім цього не повинно залишатись зон які не приймають участі у активному змішуванні. [7, 8]

У кваліфікаційній роботі пропонується змішувач роторний, який створений шляхом поєднання відомих конструкцій рамкових, дискових та турбінових робочих органів (рис. 2.1-2.2).

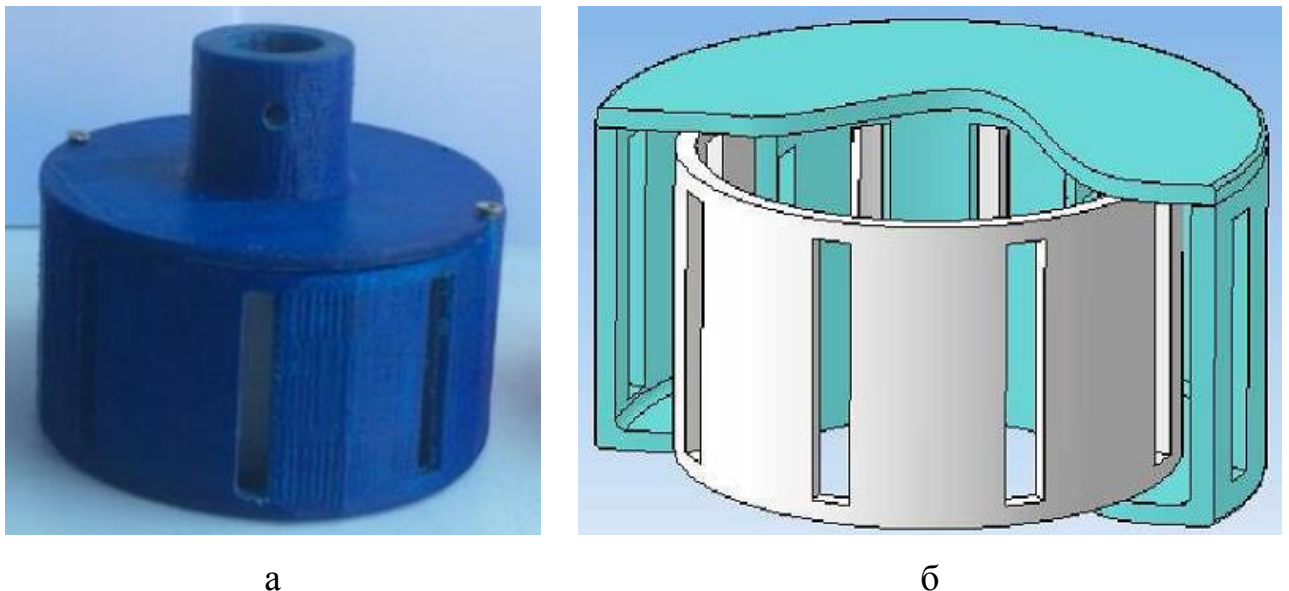


Рис. 2.1. Запропонована конструкція розробленого робочого органу змішувача рідких сумішок: а – надрукована об'ємна модель робочого органу; б – внутрішня будова спроектованого робочого органу.

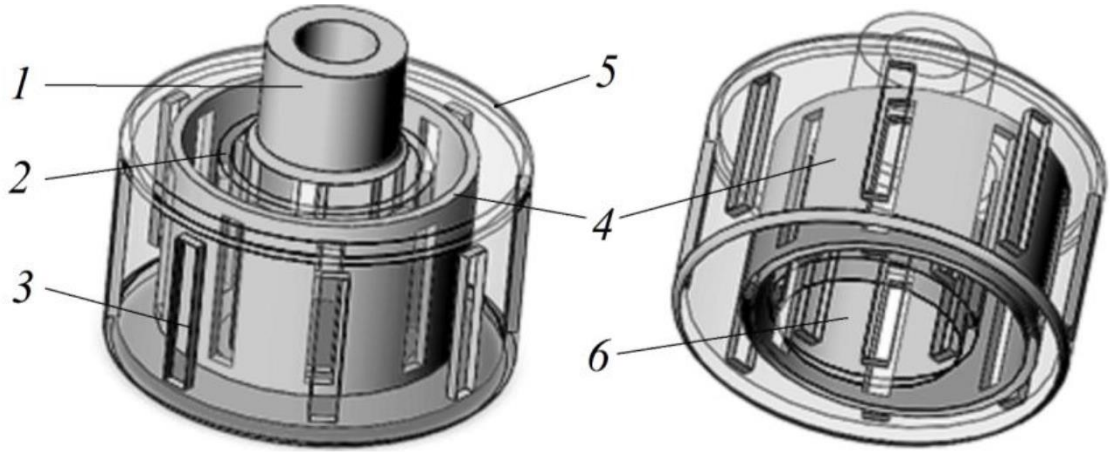


Рис. 2.2. Структурна схема запропонованої конструкції ротора-змішувача: 1 – основа; 2 – внутрішнє кільце циліндра; 3 – отвори прямокутні; 4 – середнє кільце циліндра; 5 – зовнішнє кільце циліндра; 6 – отвір впускний

Основним завданням нового робочого органу отримання суміші із вищою рівномірністю змішування. Для цього провели порівняльну оцінку із відомими конструкціями робочих органів змішувачів рідких фракцій (рис. 2.3). [9]

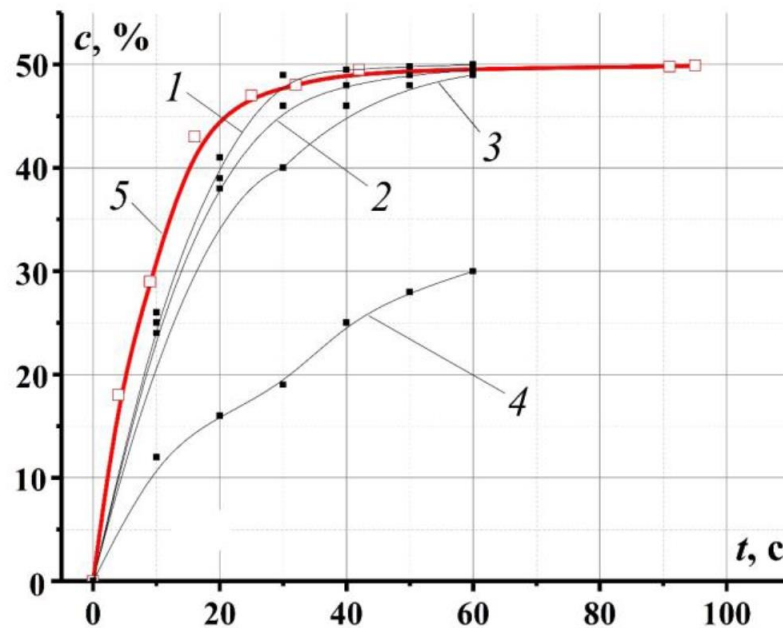


Рис. 2.3. Залежність зміни ступеня утворення однорідності (c) від тривалості процесу (t) при використанні робочих органів типу: 1 – турбіна; 2 – пропелер; 3 – лопатка; 4 – рамка; 5 – запропонований робочий орган.

Відповідно до графічних залежностей на рис. 2.3, ступінь однорідності утвореної рідкої сумішки збільшується при зростанні тривалості технологічного процесу. Проте деякі робочі органи не досягають встановленої граничної межі однорідності в 50% - це робочий орган у формі рамки. Робочі органи типів турбина, пропелер та лопатка досягають встановленого рівня концентрації, проте характер процесу вимагає різного значення тривалості.

Проведені лабораторні дослідження на лабораторній установці (рис. 2.4) довели, що розроблений робочий орган у формі циліндричного ротора має найкращі показники порівняно із іншими типами робочих органів.

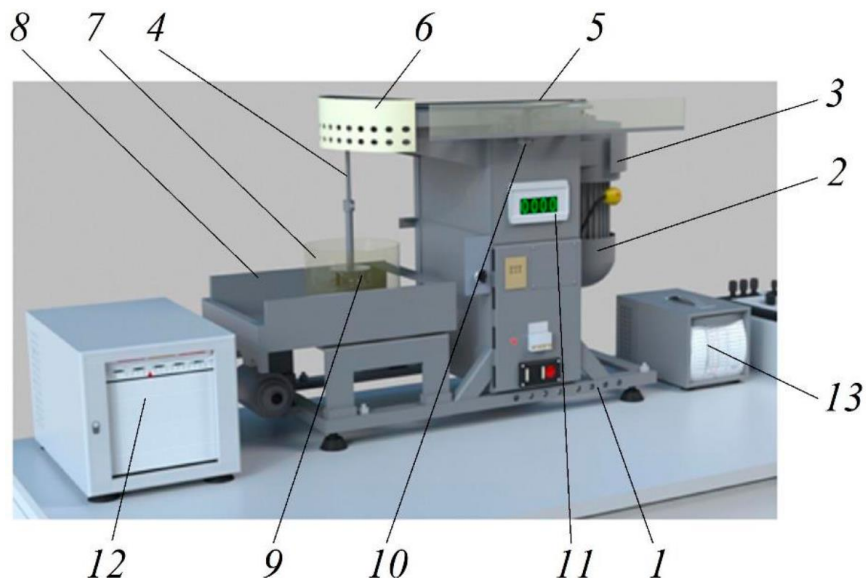


Рис. 2.4. Структура лабораторної установка визначення ефективності робочих органів для утворення рідких сумішок: 1 – рама; 2 – двигун електро; 3 – редуктор; 4 – придна вісь; 5 – пасовий привод; 6 – захист; 7 – місткість; 8 – напрямна; 9 – змішувальний пристрій; 10 – регулятор; 11 – вимірювач обертів; 12 – амперметр; 13 – вимірювач потужності.

Гарні результати випробовувань розробленого пристосування для змішувача спонукають до пошуку оптимальних конструкційних параметрів та режимів роботи.

2.2. Встановлення теоретичних передумов функціонування розробленого змішувача

Одним із інженерних показників ефективності розробленого робочого органу є забезпечення отримання найменших витрат потужності на його привод. [9-16]

З цією метою запишемо рівняння балансу витрат потужності:

$$N = N_1 + N_2, \quad (2.1)$$

де N_1 – витрати потужності на безпосередній привод розробленого робочого пристрою, Вт;

N_2 – витрати потужності на подолання гідравлічного опору розробленого змішувача ротора, Вт.

Для визначення витрат потужності складемо розрахункові схеми з геометричними та кінематичними вказівниками процесу змішування (рис. 2.5-2.6).

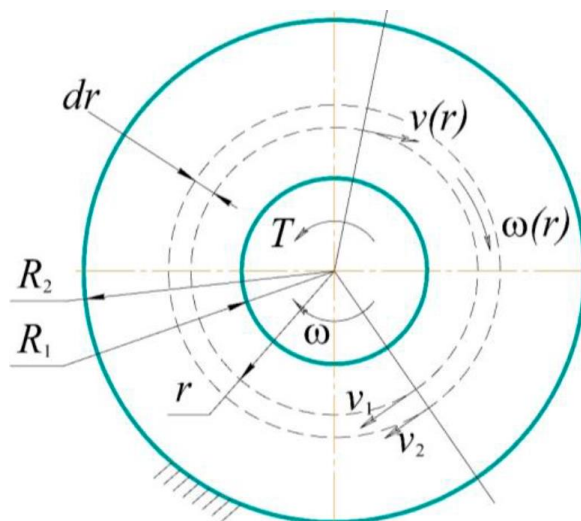


Рис. 2.5. Спрощена модель змішувача ротора

Використовуючи відомі положення гідродинамічних [16-20] процесів під час змішування, визначимо рівняння за осями координат на циліндрі:

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{v_\varphi^2}{r} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r} + \frac{\tau_{rr} - \tau_{\varphi\varphi}}{r} \right); \\ \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{\varphi r}}{\partial r} + \frac{2\tau_{\varphi r}}{r} \right) = 0; \\ \tau = \frac{1}{2} \sqrt{(\tau_{rr} - \tau_{\varphi\varphi})^2 + 4\tau_{\varphi r}^2} = \tau_0 + \left| \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} - \frac{v_\varphi}{r} \right| \\ (\tau_{rr} - \tau_{\varphi\varphi}) \left(\frac{\partial v_\varphi}{\partial r} - \frac{v_\varphi}{r} \right) = 0. \end{array} \right. \quad (2.2)$$

Розв'язком системи рівнянь (2.2) є математичні моделі які описують інтенсивність переміщення (v_φ) часточок компонентів у рідкій суміщі, рівняння встановлення моменту сили (T_I) приводу та витрат обертальної потужності (N_I) розробленого робочого пристрою ротера:

для швидкості переміщення отримали рівняння:

$$v_\varphi = \frac{\omega \cdot S_e}{b \cdot R_1} \left(a \cdot S_e^{-1} + (a - b) \cdot \ln \sqrt{b} \right), \quad (2.3)$$

для силового моменту:

$$T_I = \frac{2 \cdot \tau_o \cdot H \cdot R_2^2}{b - 1} \left(\pi \cdot S_e^{-1} + \ln \sqrt{b} \right), \quad (2.4)$$

для обертальної потужності:

$$N_I = \frac{2 \cdot \omega \cdot \tau_o \cdot H \cdot R_2^2}{b - 1} \left(\pi \cdot S_e^{-1} + \ln \sqrt{b} \right), \quad (2.5)$$

де v_φ – дотична швидкість переміщення розчину, м/с;

ω – швидкість кута, рад/с;

S_e – стале число параметра рідини;

H – габарит роторний (рис. 2.6), м;

R_I – радіус ротор по зовні, м;

R_2 – радіус по місткості (рис. 2.6), м;

τ_o – зрушення по напруженню, Па;

a – різниця між радіусами місткості та ротора, м;

b – відношення радіуса місткості до радіуса ротора, м.

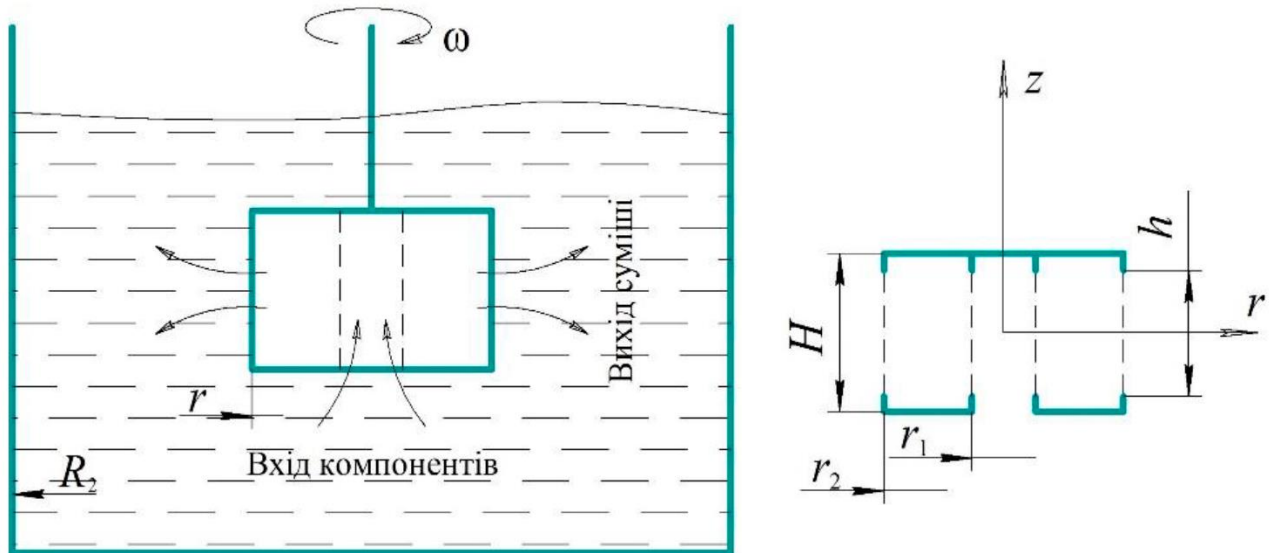


Рис. 2.6. Розрахункова схема руху ВБС скрізь канали роторного змішувача.

Якщо прийняти що рідка суміш має властивості нестисливої рідини [19], з врахуванням граничних умов та при рівномірному потоці, отримали рівняння для визначення:

пропускної спроможності робочого органу ротора:

$$Q = \frac{2 \cdot r^{3-n} h^{n+1} p}{5 \cdot R \cdot \omega^{n-1} r}, \quad (2.6)$$

витрат потужності на подолання опору на проштовхування рідини через розроблених робочий орган ротор:

$$N_2 = \frac{2 \cdot \pi \cdot K \cdot z \cdot r^{2+n} \cdot \omega^{n+1} \cdot h^{1-n}}{n-1}, \quad (2.7)$$

де n – індекс що позначає непластичності;

K – концентрація розчину рідкого, Па \times с n ;

h – канал висотою у роторі, м;

r – радіус кола до роторного пристрою, м;

z – число каналів роторі;

Результати моделювання впливу кінематичних та геометричних параметрів робочого органу для створення сумішки компонентів із водою відображено на рис. 2.7.

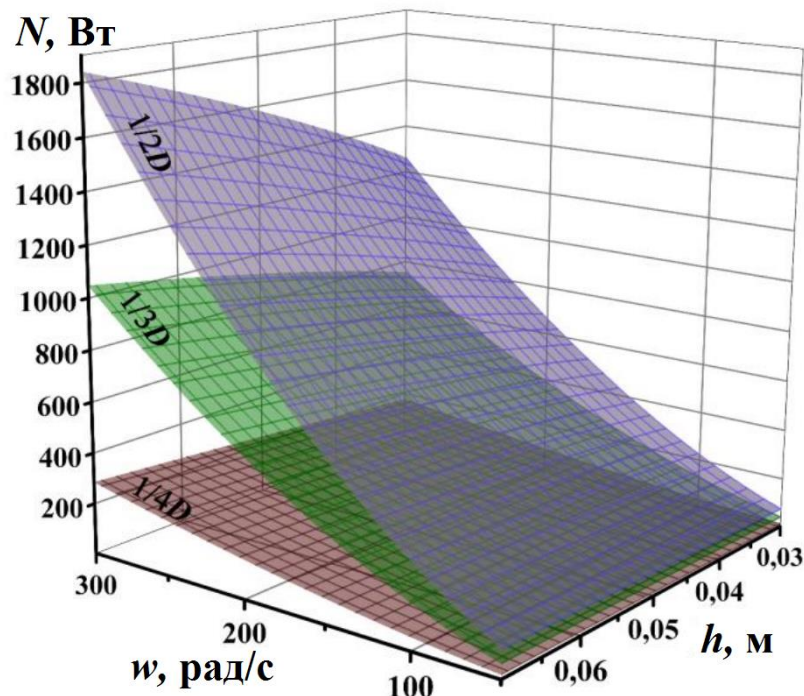


Рис. 2.7. Вплив розміру висоти (h) отвору у стінці циліндра та кутова частоти обертів (ω) на витрати потужності (N) за умови різного співвідношення зовнішнього розміру ротора та габариту місткості.

Як видно із графічних залежностей отриманих на основі виведених аналітичних рівнянь, повна потужність для приводу розробленого робочого органу збільшується зі збільшенням обертів частоти та розмірів зовнішніх параметрів ротор. Висота прямокутного отвору у стінці циліндра ротор не має суттєвого впливу на зміну потужності. Проте при максимальних габаритах

робочого органу та максимальній обертів частоті спостерігається збільшені витрати потужності при збільшені розміру отвору.

Висновки до розділу 2

1. Розроблена конструкція робочого органу змішувача компонентів у рідині. Запропонована конструкція складається із декількох циліндрів різних діаметрів які розміщені один в одному. Кожен циліндр у свої стінках має вертикальні прямокутні отвори. За рахунок обертання через нижню порожнину до внутрішнього простору надходить рідина із компонентами якій надається кінетичне прискорення. За рахунок проходження послідовно через отвори циліндрів що обертається відбувається ефективно перемішування компонентів. Порівняльна оцінка розробленого робочого роторного органу із робочими органами серійних машин для приготування рідкої опар вказала на переваги розробки у швидкості та якості отриманого продукту.

2. Отримані аналітичним чином математичні залежності дозволяють встановити основні технологічні параметри розробленого ротора для змішування компонентів у середовищі рідини. Зокрема можна визначити повні витрати потужності на привод розробленого робочого органу ротора залежно від частоти його обертів, розмірів вихідних отворів та властивостей реологічних приготованої суміші. Встановлено що при збільшені частоти обертів та габаритів роторів суттєво збільшуються витрати енергії на привод змішувача.

РОЗДІЛ 3

ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБЛЕНОГО ПЕРЕМІШУВАЧА РІДКИХ КОМПОНЕНТІВ

3.1. Встановлення впливу конструкційних та кінематичних параметрів розробленого змішувача на енергетичні показники процесу

Визначення технологічних та кінематичних показників виконували шляхом проведення лабораторних випробовувань розробленого робочого органу у формі порожнистого ротора. При цьому, розмір місткості внутрішній (D) становив діаметр 0,26 м, зовнішній габарит роторів був змінним і становив $1/2$, $1/3$ та $1/4$ частки від D , використовували електродвигун із потужністю на привод 600 Вт із системою зміни обертів фіксованого значення 500 та 1500 хв^{-1} , додатково була налаштована можливість встановлення обертів на рівні 2500 хв^{-1} , використовували комплекс систем вимірювання (рис. 2.4).

Для дослідження в якості матеріалу використовували натуральну сумішку яка формує опари, яка виготовлена із борошна пшениці та мала вологість 65%. Початкова температура опар становила 28°C при робочому об'ємі рівному 6 л та з постійним значенням густини $\rho=1063 \text{ кг/м}^3$.

Під час випробовувань використовували змінний параметр – температура розчину борошна із водою. Встановлено що при зміні температури від 24 до 35°C змінюються зсувні напруження та ступінь який характеризує в'язкість матеріалу. Встановлено, що зі зростанням температури до 35°C показник в'язкості знижується більше ніж при фіксованих температурах рідини 24°C та 28°C, при цьому рідина не набуває властивостей середовища ньютонівського.

Змінюючи вологість від 65% до 75% встановили вплив її значень на зрушувальні напруження, які прямують до нуля при зростанні вологості рідкої сумішки.

Важливим під час проведення випробовувань встановити реальні витрати енергії на привод розробленого робочого органу для встановлення раціональних конструкційних та кінематичних показників роботи.

Для отримання фактичних даних, для початку встановили реальні витрати потужності двигуна при холостій роботі, отримали середнє значення 140 Вт за вказаних обертів протягом часу 200 с.

На основі отриманих даних отримали графічні залежності (рис. 3.1-3.3) та рівняння встановлення потужності приводу двигуна залежно від розміру роторів та частоти їх обертів.

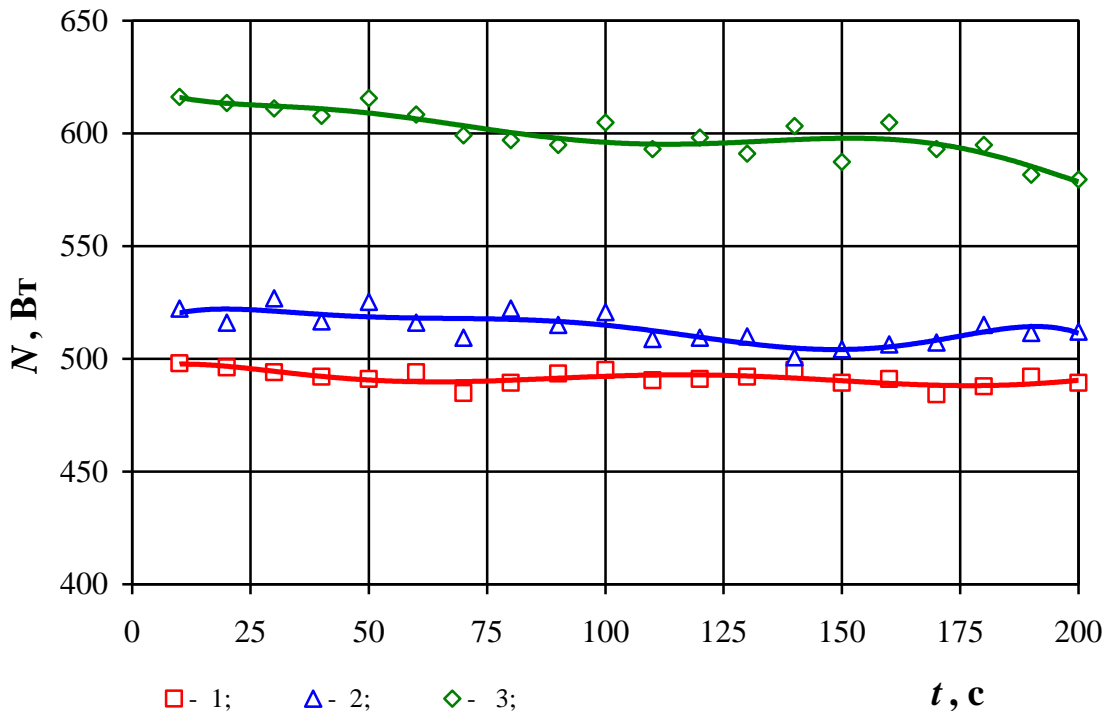


Рис. 3.1. Вплив тривалості процесу змішування (t) на витрати потужності (N) при частоті обертів 500 хв^{-1} та геометричних параметрах роторів: 1 – $1/4D$; 2 – $1/3D$; 3 – $1/2D$.

Відповідно до графічних залежностей поданих на рис. 3.1, найменші витрати потужності спостерігаються при використанні робочого органу із найменшим зовнішнім габаритом. Проте попередні дослідження (рис. 2.7) вказують на те, що загальні витрати потужності на приготування рідкої сумішки суттєво зростають при збільшенні частоти обертів. Незначні розміри отворів у стінках ротора створюють додатковий опір та знижують пропускну спроможність. Тому, доцільним буде робочий орган із більшими зовнішніми габаритними розмірами.

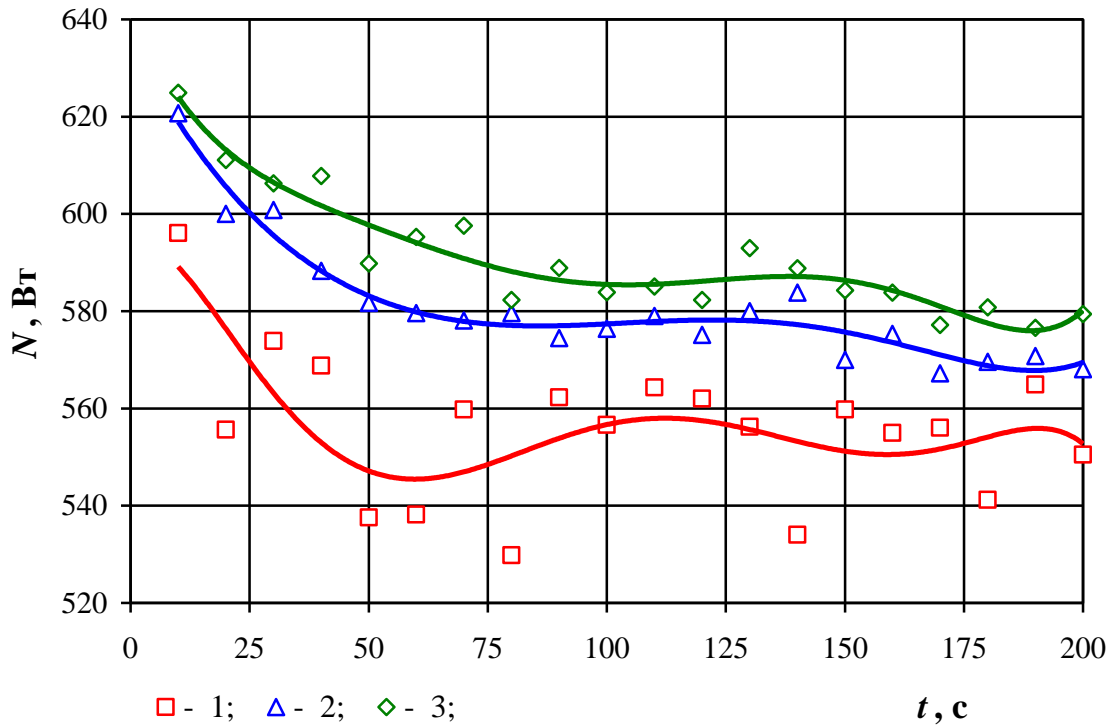


Рис. 3.2. Вплив тривалості процесу змішування (t) на витрати потужності (N) при частоті обертів 1500 хв^{-1} та геометричних параметрах роторів: 1 – $1/4D$; 2 – $1/3D$; 3 – $1/2D$.

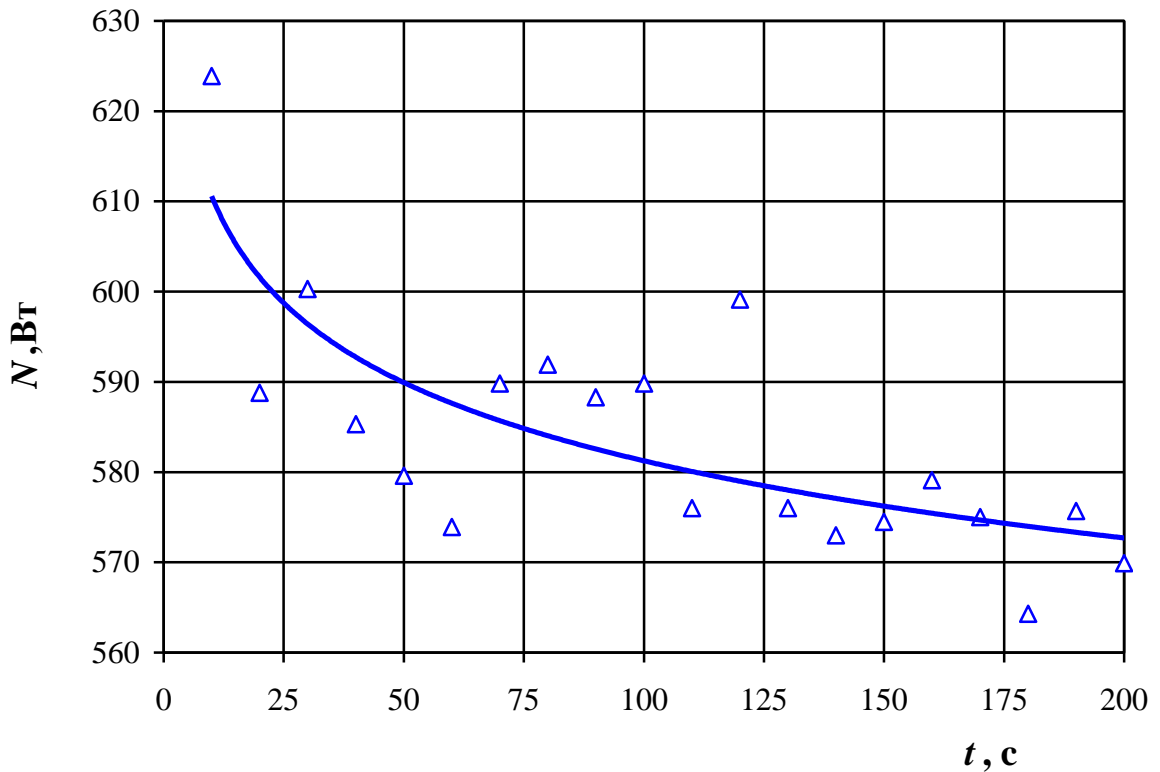


Рис. 3.3. Вплив тривалості процесу змішування (t) на витрати потужності (N) при частоті обертів 2500 хв^{-1} та геометричних параметрах ротора $1/3D$.

Відповідно до графічних залежностей поданих на рис. 3.2, для габариту робочого органу рівного 1/3D спостерігається найшвидша зміна потужнісної кривої, на рівні 70 с. Це свідчить про те, що суміш компонентів у воді досягла потрібного стану і подальше перемішування непотрібне. Тому, в подальших випробовуваннях з частотою обертів 2500 хв^{-1} використовували робочий орган із зовнішнім габаритним діаметром рівним 1/3D. Для інших досліджуваних параметрів роторів стабілізація споживання потужності спостерігається при тривалості процесу 100-110 с. При використанні меншого розміру діаметра (1/4D) прямокутні отвори в його корпусі значно менші тому створюють додаткові перешкоди руху рідини для досягнення бажаної продуктивності. А більший розмір ротора (1/2D) вимагає більших витрат на його привод із-за більшого опору самого пристрою із-за збільшення кількості рідини разового перекачування.

При збільшенні частоти обертів робочого органу до 2500 хв^{-1} (рис. 3.3) пікова потужність несуттєво відрізняється (1,5%) від значення при 1500 хв^{-1} , але за частоти обертів 1500 хв^{-1} витрати потужності зростають на 11,5%. Проте, незначна частота обертів не викликає інтенсифікації процесу змішування, витрати потужності із часом залишаються на незмінному рівні, тому такий режим вважаємо неприйнятним.

Отримали рівняння регресії, які дозволяють становити витрати потужності на привод робочого органу для частоти обертів 500 хв^{-1} відповідно до його розміру:

для ротора із діаметром 1/4D:

$$N = 498,2 \cdot t^{-0,003}, \quad (3.1)$$

для ротора із діаметром 1/3D:

$$N = 527,4 \cdot t^{-0,01}, \quad (3.2)$$

для ротора із діаметром 1/2D:

$$N = 638,5 \cdot t^{-0,02}. \quad (3.3)$$

Отримали рівняння регресії, які дозволяють становити витрати потужності на привод робочого органу для частоти обертів 1500 хв^{-1} відповідно до його розміру:

для ротора із діаметром $1/4D$:

$$N = 598,5 \cdot t^{-0,01}, \quad (3.4)$$

для ротора із діаметром $1/3D$:

$$N = 638,4 \cdot t^{-0,02}, \quad (3.5)$$

для ротора із діаметром $1/2D$:

$$N = 645,6 \cdot t^{-0,02}. \quad (3.6)$$

Отримали рівняння регресії, які дозволяють становити витрати потужності на привод робочого органу для частоти обертів 2500 хв^{-1} відповідно з розміром ротора $1/3D$:

$$N = 653,3 \cdot t^{-0,028}, \quad (3.7)$$

Досліджено вплив положення ротора, встановленого зі зміщенням на деяку величину ексцентриситету (як передбачалось має бути позитивний вплив на інтенсифікацію змішування) вказали на зростання потужності (на 8,3-10,5%) тому, конструкційно вважається недоцільним.

Шляхом проведення моделювання з використанням розмірності методу аналізу отримали критеріальне рівняння визначення потужності з врахуванням досліджуваних факторів:

$$N = 149,4 \cdot \text{Re}^{-1,37} \cdot K_p^{-1,34} \cdot K_t^{4,74} \cdot \rho \cdot \omega^3 \cdot d^4 \cdot h, \quad (3.8)$$

де K_p – коефіцієнт продуктивності;

K_t – коефіцієнт використання часу;

t – тривалість процесу змішування, с;

d – ротора діаметр по зовні, м;

ρ – густина суміші, кг/м^3 ;

h – висотка отворів у циліндрі, м.

Достовірність отриманого рівняння визначається досить високим значенням коефіцієнта кореляції на рівні 85%.

3.2. Визначення експлуатаційної ефективності отримання рідких сумішок

За результатами проведених аналітичних та лабораторних досліджень розробили експериментальний варіант змішувача рідких компонентів для виробництва опар бажаної якості (рис. 3.4).

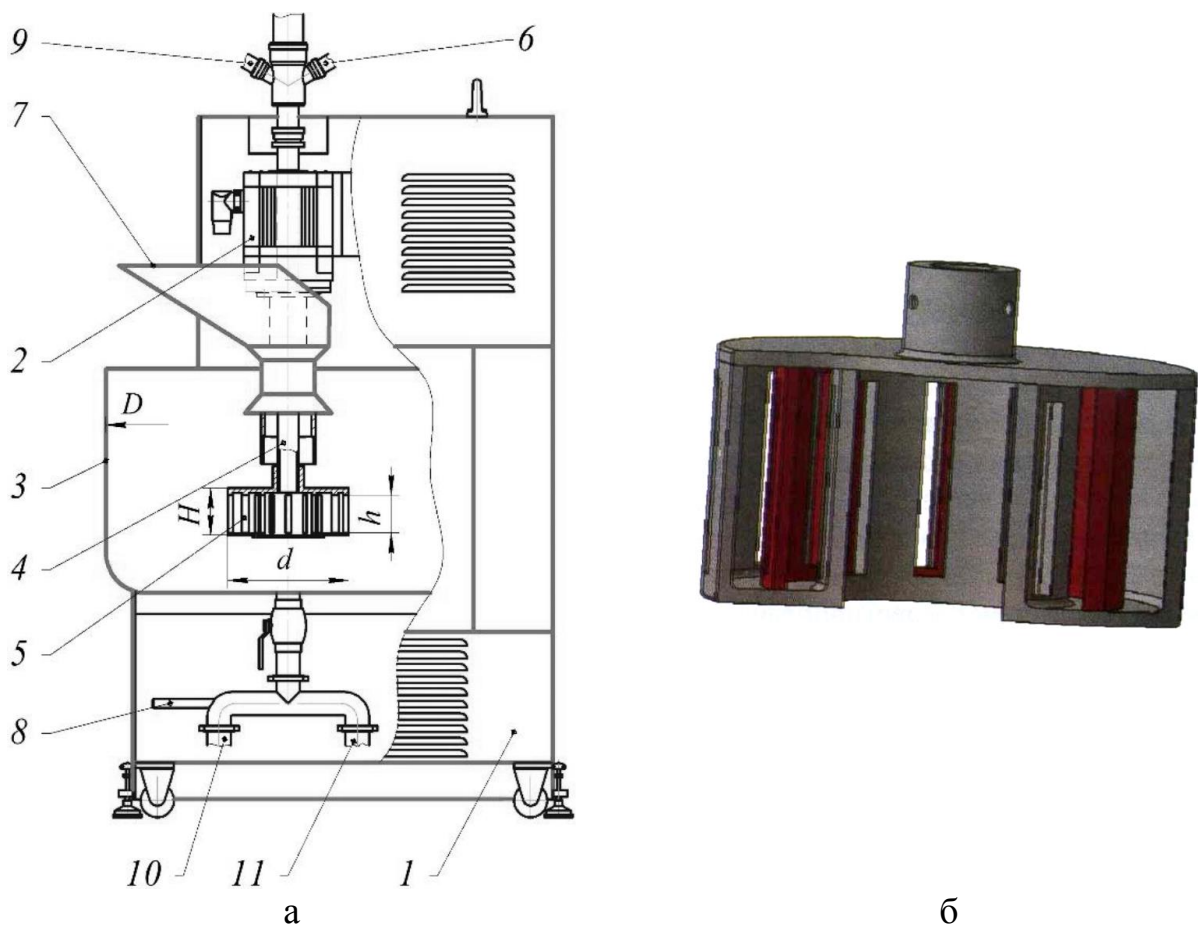


Рис. 3.4. Структурно-конструкційна схема розробленої машини для приготування рідких сумішок: а – загальний вигляд; б – робочий орган; 1 – основа; 2 – двигун із полим валом; 3 – місткість; 4 – вал приводний; 5 – робочий орган; 6 – подача компонентів; 7 – горловина; 8 – керування приводом; 9 – патрубок для рідини; 10, 11 – патрубок зливний.

Для приготування водяного розчину із компонентами спочатку у місткість наливають воду, потім вмикають електродвигун приводу робочого органу, потім подають сухі компоненти (мука).

Ефективність запропонованого обладнання визначається зменшеними питомими витратами потужності на виробництво одиниці готового продукту. З цією метою визначимо найбільш прийнятний режим роботи та конструкційні параметри робочого органу шляхом проведення експлуатаційних досліджень із використанням вимірювального обладнання (рис. 3.5).

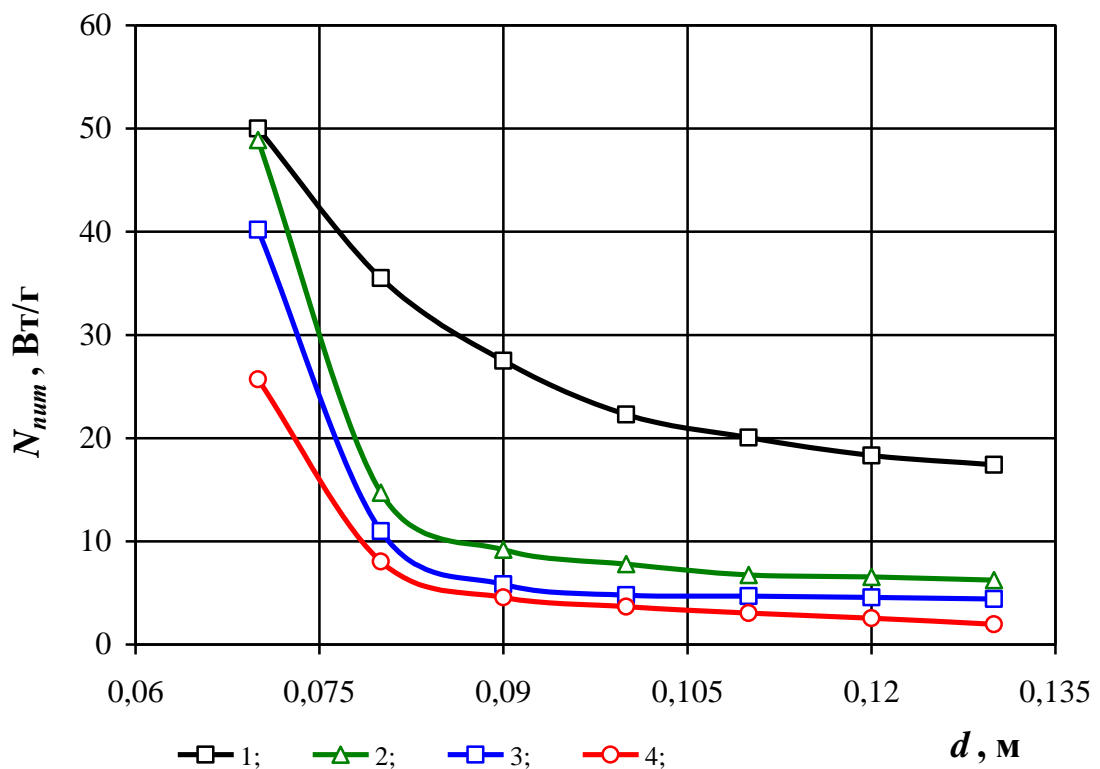


Рис. 3.5. Вплив діаметру зовнішнього робочого органу (d) та на питомі витрати енергії (N_{num}) розробленого виготовлювача опар за частоти обертів (n): 1 – 500 об/хв; 2 – 1000 об/хв; 3 – 1500 об/хв; 4 – 2500 об/хв.

Відповідно до графічних залежностей отриманих на рис. 3.5, зі збільшенням діаметра робочого органу зростають питомі витрати потужності на його привод незалежно від обертання частоти приводного вала. Найбільші питомі витрати потужності спостерігаються при частоті обертів 500 об/хв при всіх розмірах робочого органу. Так, порівняно із частотою обертів 2500 об/хв

питома потужність збільшується від 15,65 до 24,3 Вт/г при зміні діаметра роторного змішалки від 0,13 до 0,07 м. для частот обертів 1500 і 2500 об/хв значення питомих витрат потужності майже ідентичні. Суттєве зниження питомих витрат потужності, на 34,85 Вт/г при частоті обертів 1500 об/хв та на 20,58 Вт/г при частоті обертів 2500 об/хв, спостерігається при збільшенні розміру ротора від 0,07 до 0,09 м. При подальшому збільшенні розміру робочого органу зниження питомих витрат потужності не відбувається. Це вказує, що раціональним розміром ротора за зовнішнім діаметром може бути $d=100$ мм, а раціональна частота обертів $n=2500$ об/хв.

Висновки до розділу 3

1. Встановлено що при зміні температури опар від 24 до 35°C змінюються зсувні напруження та ступінь який характеризує в'язкість рідини. Так, зі зростанням температури до 35°C показник в'язкості знижується більше ніж при фіксованих температурах рідини 24°C та 28°C, при цьому рідина не набуває властивостей середовища ньютонівського. Змінюючи вологість від 65% до 75% встановили вплив її значень на зрушувальні напруження, які прямують до нуля при зростанні вологості рідкої сумішки.

2. Встановлено, що для діаметрів робочого органу 1/3D спостерігається найшвидша зміна кривої потужності на рівні 70 с. Це свідчить про те, що суміші досягла потрібного стану і подальше перемішування непотрібне. При збільшенні частоти обертів робочого органу до 2500 хв⁻¹ пікова потужність несуттєво відрізняється (1,5%) від значення при 1500 хв⁻¹, але за частоти обертів 1500 хв⁻¹ витрати потужності зростають на 11,5%. Проте, низька частота обертів не викликає інтенсифікації процесу змішування, витрати потужності із часом залишаються на незмінному рівні, тому такий режим вважаємо неприйнятним.

3. Отримали рівняння регресії, які дозволяють становити витрати потужності на привод робочого органу для частоти обертів 500 хв⁻¹, 1500 хв⁻¹ та

2500 хв⁻¹ відповідно до розміру ротора із діаметром 1/4D, 1/3D та 1/2D від діаметра місткості. Шляхом проведення моделювання з використанням розмірності методу аналізу отримали критеріальне рівняння визначення потужності з врахуванням досліджуваних факторів. Досліджено вплив положення ротора відносно осі зі зміщенням на деяку величину ексцентриситету, встановлено зростання потужності приводу на 8,3-10,5% тому, таке рішення вважається недоцільним.

4. Встановлено, що найбільші питомі витрати потужності спостерігаються при частоті обертів 500 об/хв при всіх розмірах робочого органу. Суттєве зниження питомих витрат потужності, на 34,85 Вт/г при частоті обертів 1500 об/хв та на 20,58 Вт/г при частоті обертів 2500 об/хв, спостерігається при збільшенні розміру ротора від 0,07 до 0,09 м. При подальшому збільшенні розміру робочого органу зниження питомих витрат потужності не відбувається.

5. За результатами досліджень встановлено раціональні кінематичні та конструкційні параметри розробленого робочого органу змішувача рідких компонентів. Так, зовнішній діаметр роторного змішувача становить $d=100$ мм, частота обертання вала приводу має становити $n=2500$ об/хв., роторний пристрій має знаходитись максимально до дна місткості. На привод розробленого робочого органу, при тривалості змішування порції 72 с, витрачається 0,0062 кВт×год/кг, що на 52% менше ніж серійного виготовлювача рідких суспензій.

ВИСНОВКИ

1. Важливим технологічним процесом у системі виробництва хлібобулочних виробів є отримання тіста із заданими якісними характеристиками. При виготовленні тіста використовують однофазну та багатофазну технології. За твердженням технологів багатофазна технологія дозволяє отримати продукт значно вищої якості та із подовженим терміном зберігання. Основним компонентом у виробництві тіста є опара, якість якої визначає якість отриманого тіста. Для виробництва опари промисловість пропонує обладнання як для рідкої так і для густої опари. Наявне технологічне обладнання для виробництва опари рідкої не задовольняє технологів за якістю змішування до однорідного стану маси за об'ємом.

2. Розроблена конструкція робочого органу змішувача компонентів у рідкому середовищі. Порівняльна оцінка розробленого робочого роторного органу із робочими органами серійних машин для приготування рідкої опар вказала на переваги розробки у швидкості та якості отриманого продукту.

3. Отримані аналітичні залежності що дозволяють встановити основні технологічні параметри розробленого ротора для змішування компонентів у середовищі рідини. Визначаються повні витрати потужності на привод розробленого робочого органу роторного типу залежно від частоти його обертів, розмірів вихідних отворів та властивостей реологічних приготованої суміші. Аналітично встановлено що при збільшенні частоти обертів та габаритів роторів суттєво збільшуються витрати енергії на привод змішувача.

4. Встановлено, що для діаметрів робочого органу $1/3D$ спостерігається найшвидша зміна кривої потужності на рівні 70 с. Це свідчить про те, що суміші досягла потрібного стану і подальше перемішування непотрібне. При збільшенні частоти обертів робочого органу до 2500 хв^{-1} пікова потужність несуттєво відрізняється (1,5%) від значення при 1500 хв^{-1} , але за частоти обертів 1500 хв^{-1} витрати потужності зростають на 11,5%. Проте, низька частота обертів не викликає інтенсифікації процесу змішування, витрати потужності із

часом залишаються на незмінному рівні, тому такий режим вважаємо неприйнятним.

5. Отримали рівняння регресії, які дозволяють становити витрати потужності на привод робочого органу для частоти обертів 500 хв^{-1} , 1500 хв^{-1} та 2500 хв^{-1} відповідно до розміру ротора із діаметром $1/4D$, $1/3D$ та $1/2D$ від діаметра місткості. Шляхом проведення моделювання з використанням розмірності методу аналізу отримали критеріальне рівняння визначення потужності з врахуванням досліджуваних факторів. Досліджено вплив положення ротора відносно осі зі зміщенням на деяку величину ексцентриситету, встановлено зростання потужності приводу на 8,3-10,5% тому, таке рішення вважається недоцільним.

6. Встановлено, що найбільші питомі витрати потужності спостерігаються при частоті обертів 500 об/хв при всіх розмірах робочого органу. Суттєве зниження питомих витрат потужності, на $34,85 \text{ Вт/г}$ при частоті обертів 1500 об/хв та на $20,58 \text{ Вт/г}$ при частоті обертів 2500 об/хв , спостерігається при збільшенні розміру ротора від $0,07$ до $0,09 \text{ м}$. При подальшому збільшенні розміру робочого органу зниження питомих витрат потужності не відбувається.

7. За результатами досліджень встановлено раціональні кінематичні та конструкційні параметри розробленого робочого органу змішувача рідких компонентів. Так, зовнішній діаметр роторного змішувача становить $d=100 \text{ мм}$, частота обертання вала приводу має становити $n=2500 \text{ об/хв.}$, роторний пристрій має знаходитись максимально до дна місткості. На привод розробленого робочого органу, при тривалості змішування порції 72 с , витрачається $0,0062 \text{ кВт}\times\text{год/кг}$, що на 52% менше ніж серійного виготовлювача рідких суспензій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Приготування тіста на рідких опарах і диспергованій фазі. <https://foodtechnology.pro/tehnologiya-virobnitstva-hliba/prygotuvannya-tista-na-ridkyh-oparah-i-dyspergovanij-fazi>
2. Кошман М. С. Характеристика технологічного процесу приготування тіста. *Студентські читання–2025* : матеріали науково-практичної конференції науково педагогічних працівників та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики. 30 жовтня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. С. 15–17.
3. Чепелюк О. М. Фізичне моделювання процесу приготування рідких опар / О. М. Чепелюк, О. О. Чепелюк // Хлібопекарська і кондитерська промисловість України. – 2011. - № 2 (75). – С. 3-4.
4. Кошман М. С. Оцінка способів та технічних засобів перемішування компонентів у харчовій промисловості. *Наукові читання – 2025* : збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками I-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 23 квітня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. Т. 2. С. 13-15.
5. Ферментатори для закваски. <https://www.jac-machines.com/ru/oborudovanie-dlja-testoobrabotki/fermentatory-dlja-zakvaski>
6. SPL2-80L; SPL2-150L; SPL2-300L Ферментер для закваски. <https://www.sinmag.com/en/prodetails/146/641.html/>
7. Дробот В. І. Довідник з технології хлібопекарського виробництва : навч. посіб. К.: Профкнига, 2019. 580 с.
8. Лебеденко Т. Є., Пшенишнюк Г. Ф., Соколова Н. Ю. Технологія хлібопекарського виробництва: навч. посіб. Одеса: Освіта України, 2014. 392 с.
9. Кошман М. С. Вплив форми робочого органу на ефективність змішування рідких компонентів. *Біоенергетичні системи* : матеріали ІХ міжнародної науково практичної конференції. 19-20 листопада 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. С. 9–11.

10. Процеси і апарати харчових виробництв. Теплообмінні процеси : підручник / В. С. Бойко, К. О.Самойчук, В. Г. Тарасенко, О. П. Ломейко. Мелітополь, 2020. 300 с.
11. Процеси і апарати харчових виробництв : приклади і задачі : навч. посібник / І. Ф. Малезик та ін. Київ : НУХТ, 2015. 386 с.
12. Технологічні розрахунки у хлібопекарському виробництві (задачник): Навчально-методичний посібник / за ред. В. І. Дробот. К.: Кондор, 2015. 440 с.
13. Соколенко А. І., Піддубний В. А., Гіджеліцький В. М. Фізико-хімічні методи обробки сировини і харчових продуктів : підручник. К.: Кондор, 2024. 324 с.
14. Ростовський В. С., Олейнік Н. В. Прогресивні ресурсозберігаючі технології в харчовій промисловості : навч. посібник. К.: Кондор, 2009. 196 с.
15. Практикум з технологічних розрахунків у хлібопекарському виробництві: навчальний посібник / В. І. Дробот та ін. К.: Кондор, 2025. 330 с.
16. Технохімічний контроль сировини та хлібобулочних і макаронних виробів: навчальний посібник / за ред. В. І. Дробот. К.: Кондор, 2015. 948 с.
17. Ростовський В. С. Фізико-хімічні основи технологій харчових виробництв: підручник. К.: Кондор, 2024. 476 с.
18. Процеси і апарати харчових виробництв: підручник / О. С. Марценюк, Л. М. Мельник. - К.: НУХТ, 2011. - 407 с.
19. Мирончук В. Г. Розрахунки обладнання підприємств переробної та харчової промисловості. Вінниця : Нова книга, 2004. 282 с.
20. Черевко О. І., Поперечний А. М. Процеси і апарати харчових виробництв: підручник. Х.: Світ Книг, 2014. 495 с.