

**ДНПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет
Кафедра харчових технологій

П о я с н ю в а л ь н а з а п и с к а

до кваліфікаційної роботи
ступеня вищої освіти «Магістр»
на тему:

**Обґрунтування технологічного процесу
замішування тіста при виробництві
хлібобулочних виробів**

Виконав: здобувач вищої освіти 2 курсу,
групи МГХТ-1-23
освітньо-професійної програми «Харчові технології»
зі спеціальності 181 «Харчові технології»

_____ Андрій ЦИГАНОК

Керівник: _____ Наталія СОВА

Рецензент: _____

Дніпро 2024

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра харчових технологій

Ступінь вищої освіти: «Магістр»

Освітньо-професійна програма: «Харчові технології»

Спеціальність: 181 «Харчові технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
харчових технологій,
кандидат технічних наук, доцент
_____ Віталій КОШУЛЬКО

«__» _____ 2024 р.

**З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧЕВІ ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Циганку Андрію Миколайовичу

1. Тема роботи: «Обґрунтування технологічного процесу замішування тіста при виробництві хлібобулочних виробів».
Керівник роботи: Сова Наталія Анатоліївна, кандидатка технічних наук, доцентка, затверджені наказом закладу вищої освіти від «12» листопада 2024 року №3785.
2. Строк подання здобувачем вищої освіти роботи 13 грудня 2024 року.
3. Вихідні дані до роботи: 1. Літературні джерела та періодичні видання.
2. Технологія випікання хліба
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити). Вступ. 1. Огляд літератури. 2. Чисельне моделювання.
3. Експериментальна частина. 4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. 5. Організаційно-економічна частина. Загальні висновки та пропозиції. Бібліографія. Додатки.

5. Перелік демонстраційного матеріалу

1. Мета і задачі досліджень. 2. Огляд способів приготування тіста та тістомісів. 3. Методика чисельного моделювання. 4. Результати чисельного моделювання. 5. Методика експериментальних досліджень. 6. Результати експериментальних досліджень. 7. Охорона праці та захист навколишнього середовища. 8. Організаційно-економічна частина. 6. Загальні висновки та пропозиції.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1 – 5	доцентка СОВА Наталія	12.11.2024	13.12.2024

7. Дата видачі завдання 12 листопада 2024 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	12.11-13.11.2024	виконано
2	Огляд літератури	14.11-21.11.2024	виконано
3	Чисельне моделювання	22.11-26.11.2024	виконано
4	Експериментальна частина	27.11-05.12.2024	виконано
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	06.12-07.12.2024	виконано
6	Організаційно-економічна частина	08.12-09.12.2024	виконано
7	Загальні висновки та пропозиції, бібліографія	10.12-11.12.2024	виконано
8	Розробка та підготовка демонстраційного матеріалу	12.12-13.12.2024	виконано

Здобувач вищої освіти _____ Андрій ЦИГАНОК
(підпис)

Керівник роботи _____ Наталія СОВА
(підпис)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи містить: 68 сторінок друкованого тексту, 23 рисунка, 8 таблиць та використано 48 літературних джерела.

Мета дослідження – підвищення ефективності технологічного процесу замішування тіста за рахунок удосконалення конструкції тістоміса, що забезпечить покращення якісних характеристик готового продукту, скорочення витрат енергії та часу, а також оптимізацію технологічних параметрів замішування.

Об'єкт дослідження: технологічний процес замішування тіста в хлібопекарській промисловості, зокрема робота удосконаленого тістоміса, що використовується для приготування тіста пшеничного.

Предмет дослідження: вплив технологічних параметрів на якість готового продукту в умовах роботи удосконаленого тістоміса.

Дослідження присвячене підвищенню ефективності технологічного процесу замішування тіста на удосконаленому тістомісі. У вступі викладено актуальність теми, обґрунтовано мету та завдання роботи. Перший розділ містить аналіз сучасних способів приготування тіста пшеничного та огляд існуючих конструкцій тістомісів, з висновками щодо їх переваг та недоліків. Другий розділ присвячено чисельному моделюванню процесу замішування тіста, де представлено постановку задачі, методіку моделювання та результати, що дозволяють оцінити вплив різних параметрів на якість тіста. У третьому розділі описано експериментальні дослідження, які підтверджують результати чисельного моделювання, а також методіку проведення експериментів та їх результати. Четвертий розділ розглядає аспекти охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях під час експлуатації тістоміса, а п'ятий – організаційно-економічні питання, що стосуються впровадження нових технологій у виробництво.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС, ЗАМІШУВАННЯ ТІСТА, ТІСТОМІС, ТІСТО ПШЕНИЧНЕ, ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ, ЯКІСТЬ ТІСТА, ТЕХНОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ, ОХОРОНА ПРАЦІ, ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	7
1.1 Способи приготування пшеничного тіста	7
1.2 Огляд тістомісів	14
Висновки за розділом	22
2 ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ	23
2.1 Постановка задачі	23
2.2 Методика чисельного моделювання	24
2.3 Результати чисельного моделювання	31
Висновки за розділом	39
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА	41
3.1 Постановка задачі	41
3.2 Методика експериментальних досліджень	41
3.3 Результати експериментальних досліджень	48
Висновки за розділом	53
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА.....	55
5 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	60
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ	63
БІБЛІОГРАФІЯ	65

ВСТУП

Процес замішування є ключовою операцією у хлібопекарській промисловості, під час якого борошно, вода та інші інгредієнти, під дією механічної роботи, перетворюються в однорідне тісто.

Тісто є в'язко-еластично-пластичним тілом із дуже складною поведінкою, і його варіації залежать від безлічі факторів. У випадку пшеничного тіста консистенція є складною реологічною властивістю, на яку безпосередньо впливають: в'язкість, вологість, температура, час та пропорції між фазами тіста (тверда, рідка, газоподібна), біохімічний склад борошна, додані інгредієнти та кількість енергії, що витрачається на замішування [1-3].

Під час процесу замішування тісто піддається екстремальним деформаціям, багато з яких перевищують межу руйнування через градієнти швидкості, що виникають у масі тіста. Це впливає на в'язкість тіста і, відповідно, на його консистенцію. Кількість і швидкість, з якими формуються міжмолекулярні зв'язки, залежать від інтенсивності дії замішування, кількості енергії, що вводиться в тісто, та швидкості, з якою вона передається. Отже, оптимальний, неповний або надмірний розвиток тіста безпосередньо залежить від процесу замішування [4-5].

Добре задокументовано в науковій літературі, що швидкість, з якою формується діаграма замішування, має найбільший вплив на реологічну поведінку пшеничного тіста. Дуже важливо враховувати той факт, що тісто, отримане на різних масштабах обробки (лабораторному, промисловому), матиме різні властивості. Те ж саме можна сказати й щодо використання різних типів замішувачів. У результаті реологічні властивості отриманого тіста матимуть різні характеристики. Загалом, швидкість замішувального робочого органу відома, але конфігурації як замішувального робочого органу, так і ємності дуже різні для різних типів замішувачів. Ці фактори призведуть до різного розвитку реологічних властивостей тіста під час замішування, навіть якщо замішувальні робочі органи мають однакову швидкість обертання. У реологічному плані замішувачі застосовують різні сили деформації тіста, які залежать від геометрії ємності та

замішувального робочого органу [6-7].

Тривимірне моделювання, поряд з математичним моделюванням і кореляцією експериментальних вимірювань, може призвести до більшої точності в прогнозуванні реологічної поведінки тіста під час замішування.

Мета дослідження – підвищення ефективності технологічного процесу замішування тіста за рахунок удосконалення конструкції тістоміса, що забезпечить покращення якісних характеристик готового продукту, скорочення витрат енергії та часу, а також оптимізацію технологічних параметрів замішування.

Завдання дослідження:

- провести огляд сучасних способів приготування пшеничного тіста та їх вплив на якість кінцевого продукту;
- проаналізувати конструктивні особливості та роботу різних типів тістомісів, визначити їх переваги та недоліки;
- розробити методику чисельного моделювання для дослідження механіки замішування;
- розробити методику, отримати та проаналізувати результати чисельного моделювання, зокрема, вплив різних параметрів на якість замішаного тіста;
- визначити оптимальні умови замішування тіста та порівняти їх з результатами, отриманими на традиційних тістомісах;
- розробити рекомендації щодо охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях під час експлуатації тістоміса.
- провести аналіз витрат, пов'язаних з експлуатацією удосконаленого тістоміса, та визначити економічну ефективність впровадження нової технології в промислове виробництво.

Об'єкт дослідження: технологічний процес замішування тіста в хлібопекарській промисловості, зокрема робота удосконаленого тістоміса, що використовується для приготування пшеничного тіста.

Предмет дослідження: вплив технологічних параметрів на якість готового продукту в умовах роботи удосконаленого тістоміса.

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Способи приготування пшеничного тіста

Виробництво хлібобулочних виробів у значній мірі залежить від правильності ведення кожної технологічної стадії їх виробництва, але приготування тіста є одним з вирішальних етапів у технології хліба. Властивості готового до розділення тіста в значній мірі визначають його подальший стан при поділі, формуванні тістових заготовок, їх розстоюванні та випічці, а в кінцевому підсумку обумовлюють якість готових виробів, відповідність їх вимогам нормативної документації [8-9].

Крім того, це найтриваліший етап приготування хлібобулочних виробів. Він характеризується суттєвими відмінностями в параметрах (вологість, рецептура, тривалість приготування, кислотність напівфабрикатів тощо) залежно від способу приготування тіста. Все вищесказане свідчить про можливість регулювання технологічного процесу під час приготування тіста для адаптації до умов конкретного виробництва, забезпечення випуску хлібопекарської продукції високої якості за все частіших суттєвих коливань хлібопекарських властивостей перероблюваного борошна, нейтралізації негативного впливу деяких видів сировини на хід технологічного процесу тощо [10-12].

При виборі способу приготування тіста враховують безліч факторів і умов:

- вид виробу, його рецептуру (хліб, булочні або здобні вироби, вироби зниженої вологості);
- вид, сорт і хлібопекарські властивості використовуваного борошна;
- температурні умови виробництва (регіон з жарким, помірним або холодним кліматом);
- потужність підприємства (хлібозавод або пекарня);
- тип лінії (універсальна або спеціалізована) тощо.

Тому основним завданням фахівців-хлібопекарів є правильний вибір способу приготування тіста та коректування параметрів цього процесу з урахуванням

вищезазначених факторів, тобто раціональне використання технологічних прийомів з метою забезпечення високої якості готової продукції за змінюваних умов виробництва. Приготування тіста на хлібопекарських підприємствах ведуть відповідно до технологічного плану, розробленого для кожного виду виробів. У технологічному плані вказують існуючі на підприємстві умови виробництва – обладнання, виробничу рецептуру, наводять розрахунки витрат сировини, режими технологічного процесу [13-15].

У даний час в хлібопекарській галузі застосовують багатофазні та однофазні способи приготування тіста з борошна пшеничного, які представлені на рис. 1.1. Багатофазні способи включають в себе опарні, коли приготуванню тіста передують приготування опари, а також приготування тіста на спеціальних напівфабрикатах або на рідких заквасках цільового призначення, які можуть відрізнятися за вологістю, вмістом мікрофлори, режимами, тривалістю приготування тощо. Метою приготування опари є адаптація дріжджів до анаеробних умов борошняного середовища.

Основними способами приготування пшеничного тіста, які використовують на хлібопекарських підприємствах, є опарний та безопарний. Але в останні роки активно розробляють та широко впроваджують в промисловість прискорені способи приготування тіста – на спеціальних напівфабрикатах, на заквасках цільового призначення та безопарні прискорені [16-19].

Найдавнішим способом біологічного розрихлення тіста, про що свідчить історія багатьох народів, є використання заквасок пшеничних, хмелевих, винних, горохово-анісових тощо, мікрофлора яких розвивалася спонтанно. Але й сьогодні пшеничні закваски, будучи напівфабрикатами, які отримують шляхом бродіння живильної борошняної суміші (водно-борошняної, оцукреної борошняної заварки) кислотоутворюючими, в основному молочнокислими, бактеріями, не втратили свого значення. Закваски є засобом підвищення кислотності, інтенсифікації процесу приготування тіста, покращення смаку та аромату хліба, запобігання «картопляній хворобі» хліба, плісняві [20-21].

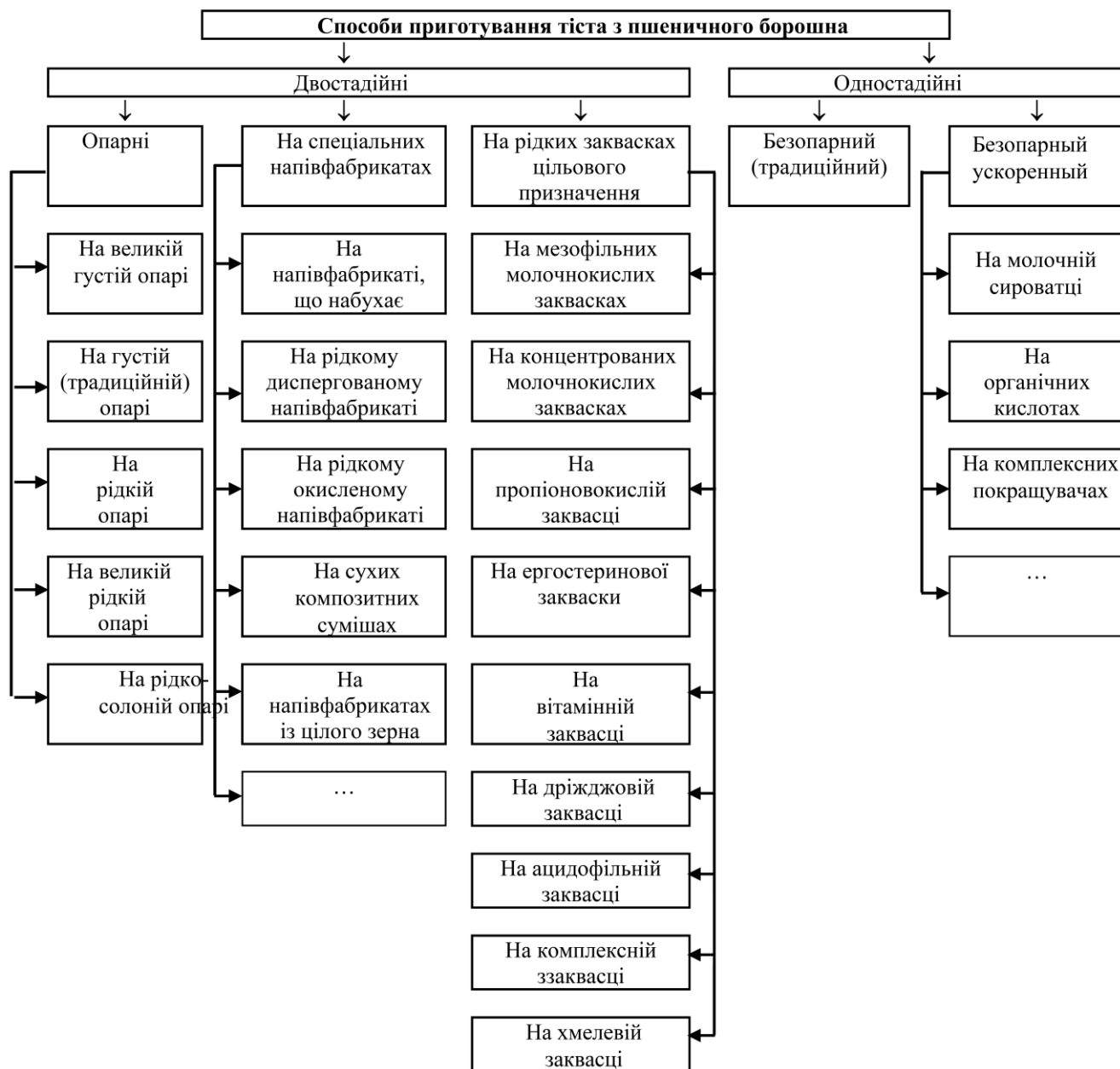


Рисунок 1.1 – Способи приготування тіста з борошна пшеничного, що застосовують на хлібопекарських підприємствах [20-23]

На пекарнях і хлібозаводах також поширені безопарні прискорені способи. Реалізація прискорених способів виробництва ґрунтується на застосуванні інтенсивного замісу, збільшенні дозування дріжджів, використанні підкислювачів (органічних кислот, молочної сироватки, «відкида» спілого тіста тощо), використанні комплексних покращувачів. Коротка характеристика напівфабрикатів і параметри приготування тіста з пшеничного борошна різними способами, які найбільш широко використовують на хлібопекарських підприємствах, представлені в табл. 1.1. Якщо провести порівняльну

оцінку способів приготування тіста з борошна пшеничного за забезпеченням високої якості готових виробів, тривалості, трудомісткості процесу тощо, то для кожного з них можна виділити переваги і недоліки, а також раціональні умови використання [24-25].

Таблиця 1.1 – Характеристика способів приготування тіста із борошна пшеничного

Варіант приготування тіста	Вологість опари (закваски), %	Випрага борошна на заміс, %		Тривалість бродіння, хв.		Особливості
		опари (закваски)	тіста	опари (закваски)	тіста	
1	2	3	4	5	6	7
На великій густій опарі	41 – 44	65 – 70	35 – 30	180 – 270	20 – 40	Додаткова механічна обробка
На традиційній густій опарі	44 – 48	45 – 55	55 – 45	180 – 270	60 – 90	
На рідкій опарі	65 – 75	25 – 35	75 – 65	180 – 300	40 – 60	
На рідко-солоній опарі	65 – 75	25 – 35	75 – 65	180 – 300	40 – 60	30–50 % солі вноситься в опару
Безопарний спосіб	–	–	100	–	150 – 240	Збільшення дозування дріжджів
Безопарний прискорений з використанням молочної сироватки	–	–	100	–	40 – 90	Посилена механічна обробка, збільшення дозування дріжджів, використання молочної сироватки
На концентрованій молочнокислій або інших пшеничних заквасках	65 – 70	3 – 5	97 – 95	240 – 480	40 – 90	Посилена механічна обробка, збільшення дозування дріжджів
На рідкій окисленій фазі (РОФ)	70 – 75	15 – 25	85 – 75	20 – 40	30 – 40	Додаткове використання джерел ліпоксигенази, рослинної олії, диспергування системи

Продовження табл. 1.1

1	2	3	4	5	6	7
На рідкій диспергованій фазі (РДФ)	65–70	20–30	80–70	20–40	30–50	Використання для виробів, рецептура яких включає жир, цукор, молочні продукти, збільшення дозування дріжджів, диспергування системи

Так, при опарному способі приготування тіста дріжджі вносять в першу фазу, що забезпечує їхню більш високу активність у тісті. Цей спосіб більш гнучкий, ніж безопарний, дозволяє легше регулювати параметри технологічного процесу приготування напівфабрикатів: вологість, тривалість бродіння, кислотність. Тому при відхиленнях у хлібопекарських властивостях борошна доцільніше використовувати саме опарний спосіб приготування тіста.

Однак опарний спосіб триваліший, для нього характерні більші витрати сухих речовин на бродіння, що, з одного боку, зменшує вихід готової продукції, але, з іншого, призводить до збільшення накопичення попередників смаку і аромату. Оскільки цей спосіб двофазний, вимагається більше обладнання та значно більше площі для його розміщення [28-30].

Спосіб приготування тіста на традиційній густій опарі характеризується універсальністю. Тісто цим способом можна готувати для всіх видів хлібних виробів: хліба, булочок, здобних, бубличних виробів, сухарів. Він за рахунок достатнього протікання біохімічних, мікробіологічних і колоїдних процесів у напівфабрикатах забезпечує хорошу якість продукції, високий об'єм, формостійкість, еластичність м'якуша, яскраво виражений смак та аромат.

Порівняно з безопарними та прискореними способами передбачено менші витрати дріжджів на приготування тіста (0,7–1,5 % замість 3,0–5,0 % до маси борошна при однофазних способах). Якщо порівняти способи приготування тіста на традиційній густій та на великій густій опарі, то у другому способі, що передбачає інтенсивну обробку тіста під час замісу, бродить в опарі більше

кількість борошна (60–70 % замість 45–50 % до маси борошна при традиційному). Це обумовлює накопичення в опарі та в тісті більшої кількості продуктів бродіння, підвищення її кислотності, покращення смаку та аромату, структури м'якуша, збільшення термінів збереження свіжості. Крім того, збільшення кількості борошна в опарі та інтенсивна обробка тіста під час замісу обумовлюють скорочення тривалості його визрівання, зменшується загальна тривалість технологічного процесу. Використання цього способу на підприємствах дозволяє механізувати приготування тіста. Для цього розроблено компактні агрегати для приготування тіста, за допомогою яких досягають значної економії виробничих площ і зменшення трудомісткості процесу в порівнянні з традиційними густими опарами, де в основному використовують обладнання для приготування тіста з підкатними діжами [31-33].

Рідкі опари, порівняно з густими, містять вдвічі менше борошна, але завдяки високій вологості в них інтенсивно протікають біохімічні процеси, глибше дезагрегуються біополімери тіста. Це обумовлює накопичення достатньої кількості продуктів їх розщеплення, необхідних для живлення дріжджів і молочнокислих бактерій, для протікання реакції меланоїдиноутворення. У цих умовах дріжджові клітини більш активні, краще накопичується їхня біомаса, кількість витрат на бродіння дещо скорочується.

При роботі на рідких опарах легко регулювати технологічний процес, вони мають меншу здатність до переокисання при непередбачених перервах у роботі. Рідкі опари легко транспортувати по трубопроводах, легко дозувати, внаслідок чого забезпечуються умови для створення комплексно-механізованих та автоматизованих ліній по їх приготуванню [32-35].

Однак внаслідок бродіння меншої кількості борошна в рідкій опарі (25–35 % до маси борошна) і високої її вологості продукція, приготована на ній, має менш виражений смак і аромат, швидше черствіє. Внесення в опару мезофільних молочнокислих заквасок або рідких дріжджів підвищує їх кислотність, що сприяє прискоренню визрівання опар та тіста. Приготування тіста на рідкій окиснювальній фазі передбачає приготування напівфабрикату – попередньої

окиснювальної системи, в якій роль окиснювача відіграє фермент липоксигеназа соєвого або горохового борошна (або іншого джерела ферменту). Крім того, передбачено внесення рослинної олії (або жироводної емульсії), в результаті чого створюються умови для утворення пероксидів, які є активними окиснювачами. Застосування цього способу приготування тіста найбільш доцільно при переробці борошна зі слабкою клейковиною або свіжозмеленого. У результаті покращуються реологічні властивості тіста, його газо- та формозберігаюча здатність, об'єм і форма хліба, властивості м'якуша, більш виражені смак і аромат готових виробів, збільшується період збереження їх свіжості в порівнянні з виробами, приготованими із застосуванням безопарного способу ведення тіста [36-38].

На рідкій диспергованій фазі – спеціальному рідкому напівфабрикаті, отриманому шляхом диспергування частини борошна, молочної сироватки, води та додаткової сировини, готують тісто для хлібобулочних та здобних виробів, до рецептури яких входять молочні продукти.

Методи приготування тіста на окисненій та диспергованій фазах значно коротші за часом, ніж опарний, вимагають меншої кількості технологічного обладнання та виробничих площ. Однак необхідно мати установку для диспергування маси. На одній окисненій або диспергованій фазі можна готувати тісто для виробів з різними рецептурами.

Проте ці способи передбачають підвищене дозування дріжджів (до 3–5 % до маси борошна), не забезпечують проходження глибоких колоїдних і біохімічних процесів під час дозрівання тіста, особливо на рідкій диспергованій фазі, тому м'якуш виробів може бути недостатньо еластичним. Смак і аромат виробів формуються переважно цукром, жиром, молочними продуктами, які входять до складу рецептури хлібобулочних та здобних виробів. Хліб високої якості цим способом виробити не вдається.

Однофазні способи приготування тіста (безопарний та прискорений) мають короткий технологічний цикл. Порівняно з опарним способом тривалість приготування тіста скорочується більше ніж вдвічі при безопарному способі і в 2,5–3 рази при прискорених способах. Витрати сухих речовин на бродіння

зменшуються на 1,2–1,5 %. Приготування тіста в одну стадію вимагає значно менше обладнання, ємностей для бродіння, виробничих площ, завдяки чому прискорені способи знаходять широке застосування в умовах пекарень.

У випадку використання прискорених способів необхідно застосовувати заходи, які призводять до інтенсифікації мікробіологічних, колоїдних і біохімічних процесів, що забезпечує швидке дозрівання тіста. Для цього необхідна установка тістомісильних машин інтенсивної дії, по можливості підвищення температури бродіння тіста, використання підвищеної кількості дріжджів, а також – добавок: підкислювачів, ферментних препаратів або комплексних покращувачів. Безопарний та прискорений способи приготування тіста технологічно негнучкі, тобто при цих способах неможливо за необхідності коригувати вологість, температуру вже замішаного тіста [39].

Використання хлібопекарських покращувачів, які в більшості є імпортною сировиною синтетичного походження, для інтенсифікації процесу приготування тіста та покращення якості готових виробів піднімає питання безпечності хліба – найважливішого продукту на нашому столі. Тому при виробництві масових видів виробів прискорені способи приготування тіста майже не застосовують.

У останні десятиліття особливу увагу приділяють вивченню багатовікового досвіду використання заквасок у хлібопекарському виробництві та можливості покращення їх технологічних властивостей, використовуючи сучасні досягнення науки та техніки. Так, застосування методів селекції (гібридизація, мутагенез, адаптація, комбіновані методи впливу на генетичний апарат і обмінні функції мікроорганізмів тощо) дозволило отримати види і штами мікроорганізмів, що розвиваються в борошняних середовищах і мають певні технологічні властивості: бродильну, кислотоутворюючу активність, осмочутливість, бактерицидні властивості по відношенню до спорових бактерій тощо [40].

1.2 Огляд тістомісів

На ринку існує безліч різних систем для замішування тіста (рис. 1.2, табл.

1.2), які, залежно від типу конструкції, призначені для спеціальних цілей застосування. Загалом порівнювати системи замішування тіста між собою важко, оскільки конструкція відрізняється у багатьох аспектах. Взаємодія окремих параметрів, таких як форма замішувального робочого органу та розмір діжі, а також технічні характеристики, такі як швидкість обертання важеля, діжі та потужність двигуна, визначають процес замішування. Інтенсивність замішування значною мірою визначається діаметром і формою замішувальних робочих органів разом із їх відстанню до стінок діжі. Вибір тістоміса зазвичай здійснюється відповідно до продукту, який планується виготовляти, та якості доступного борошна. Таким чином, для пшеничних виробів віддають перевагу тістомісам, що забезпечують інтенсивне замішування з високим енергетичним вкладенням. У випадку житніх виробів увагу приділяють більш делікатному замішуванню [41-45].

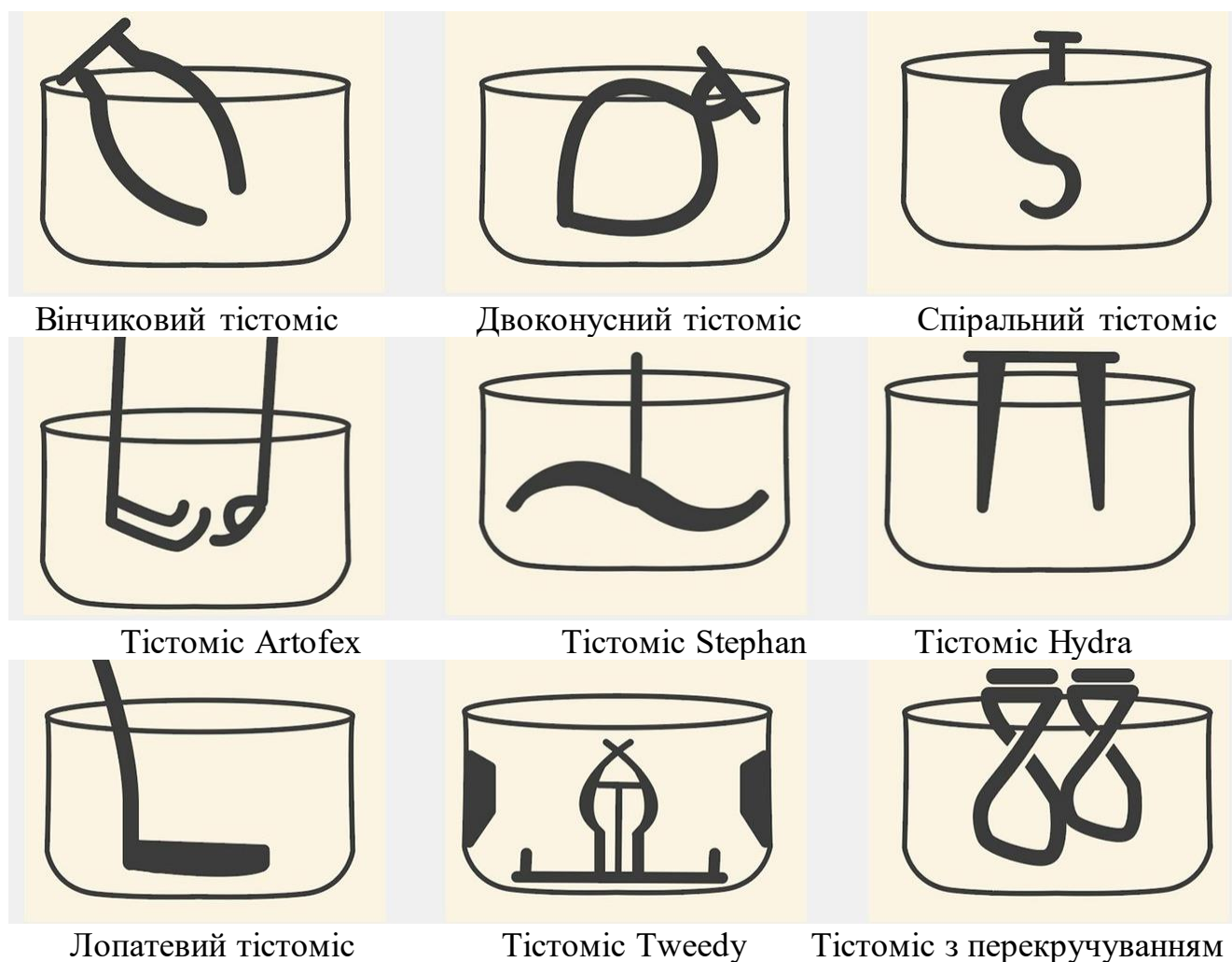


Рисунок 1.2 – Класифікація робочих органів тістомісів [43-44]

Таблиця 1.2 – Класифікація систем замішування за енергією змішування

	Система замішування	Тип хлібобулочних виробів
Міксер з низькою енергією замішування	Лопатевий тістоміс	хліб із змішаного зерна; змішаний житній хліб; хліб із крупного зерна
	Двоконусний тістоміс	хліб із змішаного зерна; змішаний житній хліб; хліб із крупного зерна
	Тістоміс Artofex	пшеничні вироби; кондитерські дріжджі; тістечка
	Вінчиковий тістоміс	пшеничні вироби
Міксер з нормальною енергією замішування	Спіральний тістоміс	змішане пшеничне хліб та змішане житне хліб; змішаний зерновий хліб; грубозерновий хліб; пшеничні вироби; кондитерські дріжджі; тістові вироби
	Тістоміс з перекручуванням	пшеничні вироби
Міксер з високою енергією замішування	Тістоміс Hydra	пшеничні вироби
	Тістоміс Tweedy	пшеничні вироби
	Тістоміс Stephan	пшеничні вироби
	Горизонтальний змішувач	пшеничні вироби

Щоб утворити тісто з окремих інгредієнтів, під час замішування відбувається багато хімічних та фізичних процесів, частково один за іншим, але й паралельно. Тут процеси під час замішування поділяють на дві фази.

Першу фазу також називають фазою замішування. Тут окремі види сировини змішуються однорідно, і в цей час частинки борошна зволожуються водою. Одночасно починаються початкові процеси розчинення та набухання, в результаті чого розчиняються цукрові речовини (моносахариди, дисахариди), декстрини та білки (альбуміни і глобуліни).

Під час другої фази замішування внаслідок подачі енергії за допомогою замісних лопатей та реакції функціональних груп (тіолової групи і дисульфідних зв'язків) відбувається структуризація білкових фракцій гліадину та глютеніну, при

цьому утворюється тривимірна, сітчаста структура – глютеніва сітка. У цю сітку вбудовані крохмальні зерна.

Процеси під час замішування [42-43]:

- зволоження крохмалю;
- набухання харчових волокон;
- розчинення водорозчинних інгредієнтів;
- білки, цукри, мінерали, геміцелюлоза;
- подача газу та його зв'язування;
- активація дріжджів;
- накопичення води та формування глютенівої сітки;
- початок ензимного розкладання;
- крохмаль, білки, пентозани.

Час замішування в наступній таблиці залежить від якості борошна, розміру машини, ємності чаші та виходу тіста. Тут наведений час замішування є орієнтовним значенням та може допомогти визначити оптимальний час замішування для процесу.

Таблиця 1.3 – Час замішування різних видів тіста в залежності від замішувальної системи

Замішувальна машина	Пшеничні хлібобулочні вироби	Змішаний пшеничний хліб 80/20	Змішаний пшеничний хліб 60/40	Змішаний житий хліб 60/40	Змішаний житий хліб 80/20
Лопатевий тістоміс	–	–	–	–	–
50–60 обертів (хв)	до 25	15	15	10	10
90–120 обертів (хв)	12–15	12	9	7	5
Подвійний конусний тістоміс	10–12	8	6	5	4
Спіральний тістоміс	2+6	2+5	2+4	5+2	6+1
Закручувальний тістоміс	2+5	2+4	3+3	4+1	3+1
Тістоміс Stephan	1–2	не може бути використаний через нагрівання тіста			

На рис. 1.3 наведено загальний вигляд тістоміса.



Спиральний тістоміс (DIOSNA)

Закручувальний тістоміс (DIOSNA)

Рисунок 1.3 – Загальний вигляд тістоміса

Правильний час замішування залежить від численних факторів і має великий вплив на тривалість виробництва хлібобулочних виробів. Для досягнення оптимальної якості хлібобулочних виробів необхідно узгодити наступні фактори: якість сировини; замішувальну систему; швидкість замішування; тип тіста; об'єм тіста; щільність тіста; температуру тіста; метод замішування; попередники; попередню обробку борошна [44-46].

Впливи та наслідки неправильного замішування на якість хлібобулочних виробів показані в табл. 1.4.

Тісто для хліба із житнього, грубого житнього та змішаного житнього борошна з високим відсотком жита зазвичай замішують повільно та менш інтенсивно.

Тісто для виробів із пшеничного, змішаного пшеничного та змішаного

зернового борошна змішують інтенсивно, залежно від відсотка пшениці.

Як правило: чим вищий відсоток жита, тим довша фаза повільного замішування; чим вищий відсоток пшениці, тим довше інтенсивне замішування.

Таблиця 1.4 – Вплив замішування на якість хлібобулочних виробів

Якість замішування	Ефект
Недостатньо замішане тісто	<ul style="list-style-type: none"> - поганий підйом тіста в духовці; - малий об'єм; - низька аерація з частково грубою текстурою м'якушки (вільна вода); - невелика тріскучість скоринки; - погана хрусткість.
Правильно замішане тісто	<ul style="list-style-type: none"> - гарний підйом у духовці; - оптимальний об'єм випічки; - виразні тріщини на скоринці; - хороша аерація крихти; - рівномірна текстура крихти.
Перемішане тісто	<ul style="list-style-type: none"> - поганий підйом в духовці; - маленький об'єм; - низька аерація; - прилипла тріщина скоринки; - слабка тріщина скоринки; - пласка форма виробів.

Наступна ілюстрація (рис. 1.4) показує міцність тіста залежно від часу замішування. Кожне тісто має індивідуальний оптимум замішування. Тривалість замішування може, залежно від якості сировини та інтенсивності замішування, мати різну довжину. У фазі перевищення замішування тісто знову стає м'якшим, що може призвести до відповідних дефектів у виробах.

Фактор нагрівання тіста та, відповідно, температура тіста є сумою всіх факторів, що забезпечують енергію, таких як якість сировини, температура інгредієнтів і навколишнього середовища, замішувальна система та час замішування. У табл. 1.5 наведена порівняльна характеристика різних замішувальних систем з точки зору енергетичних витрат [47-48].

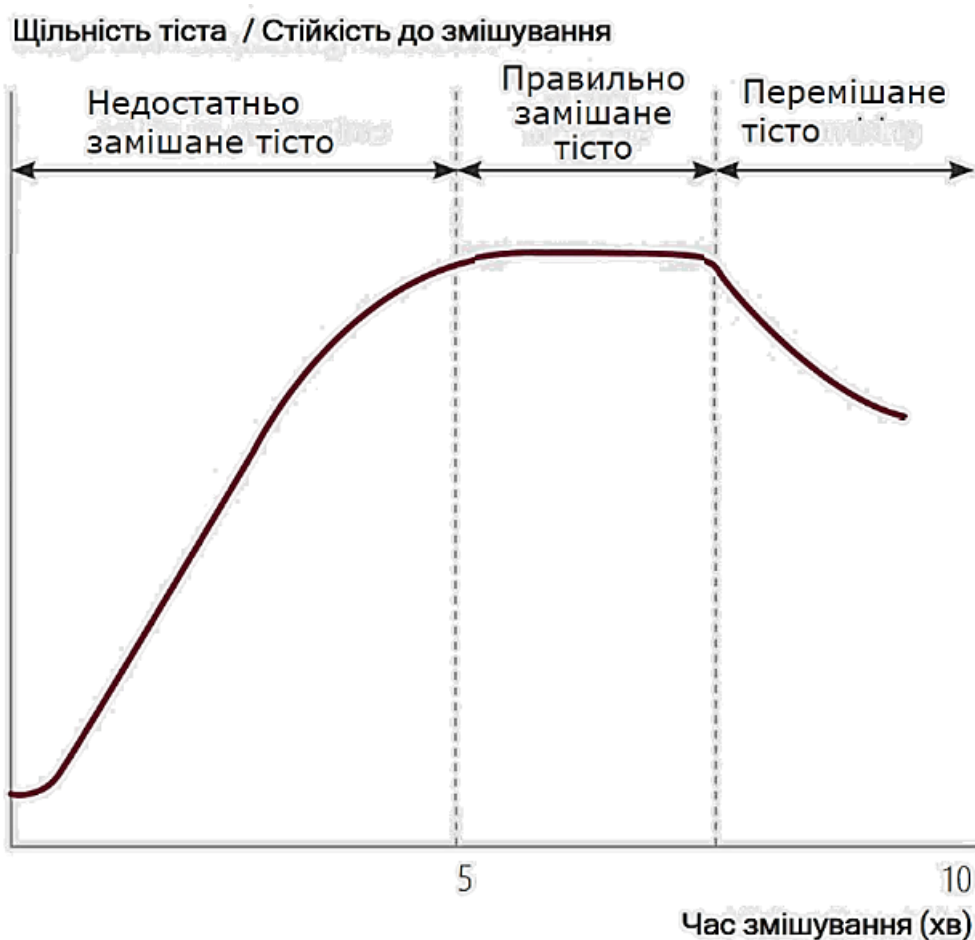


Рисунок 1.4 – Щільність тіста в залежності від часу замішування [1-4]

Таблиця 1.5 – Нагрівання тіста в залежності від замішувальної системи

Тістоміс	Частота обертання, об/хв	Час замішування, хв	Температура нагрівання тіста, °C
Тістоміс Stephan	2400	0,75	14
Тістоміс Stephan	1140	1-1,5	10
Спіральний тістоміс	120-150	7-9	7
Тістоміс з перекручуванням	180-240	6-8	6
Двоконусний тістоміс	100-120	10-12	3
Лопатевий тістоміс	90	12-15	2

Температура тіста є ще одним важливим параметром після часу замішування для виробництва хлібобулочних виробів. Вона регулюється індивідуально залежно від параметрів методу приготування тіста та відповідного виду випічки. Вже під час часу замішування та наступного часу обробки об'єму відбуваються важливі процеси в тісті, які регулюються температурою тіста. Серед них: набухання

компонентів борошна; регулювання розвитку тіста; вплив на процеси бродіння; регулювання ензиматичних процесів.

Нижче наведено середні оптимальні температури тіста для різних видів хлібобулочних виробів. Ці цифри слід розглядати як орієнтовні значення, які можуть змінюватися в залежності від відповідних умов на підприємстві.

Середні оптимальні температури тіста (°C):

- грубий житній хліб: 30–32;
- житній хліб: 28–30;
- змішаний житній хліб: 27–29;
- змішаний пшеничний хліб: 25–27;
- пшеничний хліб: 25–27;
- тостовий хліб: 27–29;
- грубий пшеничний хліб: 24–26;
- пшеничні ранкові вироби: 24–28 (залежно від методу приготування тіста);
- кондитерські дріжджові тістечка: 20–26 (залежно від методу приготування тіста);
- ламіновані кондитерські дріжджові тістечка: 15–18.

Добра оброблюваність та сухе і ворсисте тісто мають тісний зв'язок з температурою тіста. Занадто холодне або занадто тепле тісто важко обробляти, і зазвичай це призводить до дефектів у випечених виробах. У табл. 1.6 показано вплив на якість випечених виробів [1-5].

Таблиця 1.6 – Вплив температури тіста на поведінку тіста та якість випечених виробів

Температура тіста	Ефект
Занадто холодне тісто	<ul style="list-style-type: none"> - тривалий час остаточного бродіння; - низька аерація; - недостатній ароматичний смак; - вузька тріщина на скоринці.
Занадто тепле тісто	<ul style="list-style-type: none"> - більш швидке остаточне бродіння; - менший час набрякання; - сильніше руйнування текстури тіста; - гірші властивості утримання газу; - занадто нерівномірна текстура м'якушки; - тьмяна верхня поверхня; - широка тріщина на скоринці.

Висновки за розділом

Приготування пшеничного тіста є ключовим етапом у технології виробництва хлібобулочних виробів, оскільки від його якості залежить кінцевий продукт. Правильний вибір способу приготування тіста, враховуючи тип виробу, характеристики борошна та умови виробництва, є важливим для досягнення високої якості хліба. Використання різних методів, таких як опарний та безопарний, дозволяє адаптувати технологічний процес під специфічні умови підприємства, регулювати параметри приготування та покращувати органолептичні властивості готової продукції. Багатофазні та однофазні способи, включаючи новітні технології, сприяють підвищенню ефективності виробництва та якості хлібобулочних виробів, що робить їх актуальними для сучасної хлібопекарської промисловості.

Вибір та ефективність тістомісів є критично важливими для виробництва хлібобулочних виробів, оскільки різні системи замішування мають свої специфічні характеристики, які визначають якість та властивості готового продукту. Різні типи тістомісів, зокрема вінчикові, двоконусні, спіральні та лопатеві, забезпечують різну інтенсивність замішування в залежності від типу борошна та бажаних характеристик тіста. Процеси, що відбуваються під час замішування, такі як зволоження, набухання, розчинення, формування глютенної сітки та активація дріжджів, суттєво впливають на кінцеву якість хлібобулочних виробів. Час та температура замішування є важливими параметрами, які потрібно контролювати, оскільки їх неправильне регулювання може призвести до дефектів у випечених виробах. Усі ці фактори підкреслюють необхідність комплексного підходу до вибору обладнання та технологічних процесів, щоб досягти оптимальної якості продукції.

2 ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

2.1 Постановка задачі

Тісто є в'язко-еластично-пластичним тілом із дуже складною поведінкою, і його варіації залежать від безлічі факторів. У випадку пшеничного тіста консистенція є складною реологічною властивістю, на яку безпосередньо впливають: в'язкість, вологість, температура, час та пропорції між фазами тіста (тверда, рідка, газоподібна), біохімічний склад борошна, додані інгредієнти та кількість енергії, що витрачається на замішування.

Під час процесу замішування тісто піддається екстремальним деформаціям, багато з яких перевищують межу руйнування через градієнти швидкості, що виникають у масі тіста. Це впливає на в'язкість тіста і, відповідно, на його консистенцію. Кількість і швидкість, з якими формуються міжмолекулярні зв'язки, залежать від інтенсивності дії замішування, кількості енергії, що вводиться в тісто, і швидкості, з якою вона передається. Отже, оптимальний, неповний або надмірний розвиток тіста безпосередньо залежить від процесу замішування.

Швидкість, з якою формується діаграма замішування, має драматичний вплив на реологічну поведінку пшеничного тіста. Дуже важливо враховувати той факт, що тісто, отримане на різних масштабах обробки (лабораторному, промисловому), матиме різні властивості. Те ж саме можна сказати й щодо використання різних типів замішувачів. У результаті реологічні властивості отриманого тіста матиме різні характеристики.

Загалом, швидкість замішувального робочого органу відома, але конфігурації як замішувального органу, так і ємності дуже різні для різних типів замішувачів. Ці фактори призведуть до різного розвитку реологічних властивостей тіста під час замішування, навіть якщо замішувальний робочий орган має однакову швидкість обертання. У реологічному плані замішувачі застосовують різні сили деформації тіста, які залежать від геометрії ємності та замішувального робочого органу.

Використання реологічних характеристик харчових матеріалів застосовують

не лише для хлібного тіста, а також для багатьох інших матеріалів, таких як: паста, рідини (вина, соки і соуси), гелі, суспензії дріжджів, колаген, крохмаль, але особливо для полімерів та біополімерів.

Тривимірне моделювання, поряд з математичним моделюванням і кореляцією експериментальних вимірювань, може призвести до більшої точності в прогнозуванні реологічної поведінки тіста. Основні задачі цього розділу полягають у:

- доведенні геометричного впливу замішувальних робочих органів на реологічний розвиток тіста;
- оцінці розподілу швидкості деформації тіста під час замішування за допомогою тривимірного моделювання процесу замішування;
- валідації математичної моделі для розрахунку опору.

2.2 Методика чисельного моделювання

На першому етапі для моделювання процесу замішування тіста використовували програму кінцевих елементів Star-CCM+ для 3D-симуляції. Для двох моделей замішувачів зі здвосними вертикальними робочими крюками та рухомими ємностями – були створені тривимірні геометрії в масштабі за допомогою програми CAD. Ці дві моделі мають робочі органи з різною геометрією, як показано на рис. 2.1 та 2.2. Потім ці моделі були передані в пакет препроцесингу в програмі Star-CCM+.

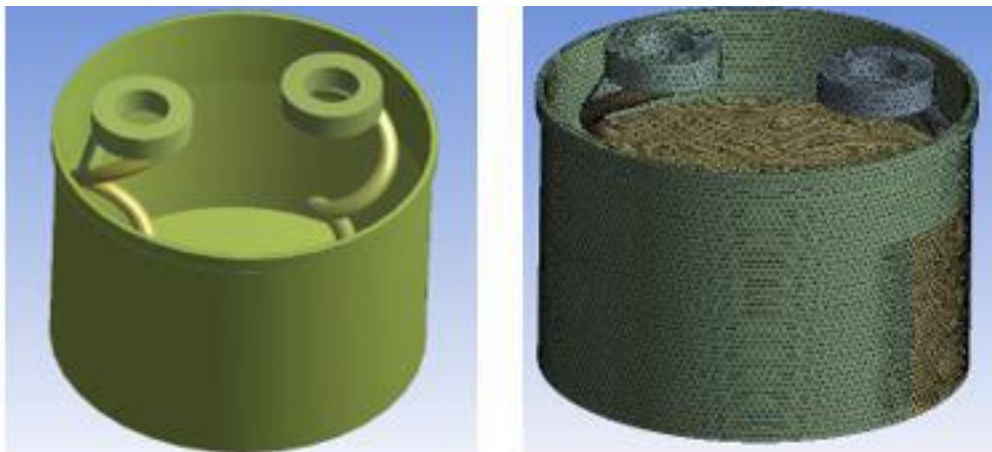


Рисунок 2.1 – Замішувач із спіральними замішувальними робочими органами

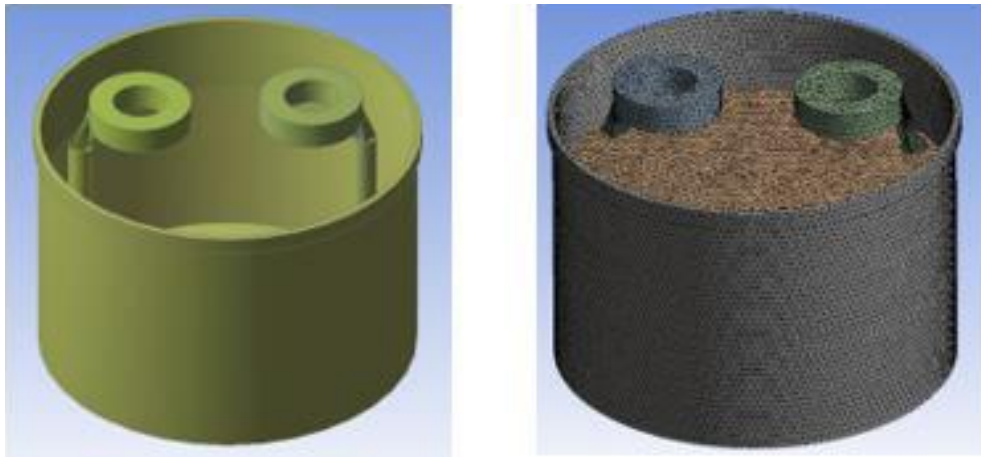


Рисунок 2.2 – Замішувач з прямими замішувальними робочими органами

Для запуску та дискретизації моделі були застосовані такі припущення і спрощення: ємність повністю заповнена тістом, тісто є однорідною масою в повному розвитку після завершення періоду гідратації та розглядається як неньютонівський, нестисливий матеріал. Відомо, що протягом усього процесу замішування тісто постійно змінює свою в'язкість. Якщо процес замішування продовжується після досягнення максимальної в'язкості, тісто переходить на спадну криву. З урахуванням цих факторів для тривимірного моделювання замішування було обрано модель Карро-Ясуда. Функцію в'язкості рідини, η , було змодельовано за допомогою конституційного співвідношення Карро-Ясуда (відомого своєю здатністю відображати різні поведінки зниження в'язкості під дією зсуву):

$$\frac{\eta(\dot{\gamma}) - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = [1 + (\lambda \dot{\gamma})^a]^{\frac{n-1}{a}} \quad (2.1)$$

де η – в'язкість зсуву; η_0 – в'язкість при нульовій швидкості зсуву; η_{∞} – в'язкість при нескінченній швидкості зсуву; λ – характеристичний час; $\dot{\gamma}$ – швидкість зсуву; a – структурний показник ($a = 2$ для моделі Карро), а n – показник ступеня ($-1 \leq n < 1$ для рідини зі зниженням в'язкості при зсуві).

Значення вихрової в'язкості, отримані в кінці симуляції, допомагають інтерпретувати зміщення шарів у масі тіста під час замішування. Концепція вихрової в'язкості ґрунтується на принципі подібності, де турбулентність є

фізичним поняттям, пов'язаним з в'язкістю. У рівнянні Нав'є–Стокса в'язкий член має вигляд:

$$D_v = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2.2)$$

де ν – кінематична в'язкість, U_i , U_j – тензори швидкості, x_j , x_i – поперечні координати.

Для виконання симуляції були прийняті такі параметри:

- тісто є однорідною масою, що складається з борошна, води та солі, з загальною масою 216 кг;
- симуляція проводилася в умовах стабільності тіста за постійної густини $\rho = 1200 \text{ кг/м}^3$ (визначено методом зваженого середнього);
- температура тіста приймалась на рівні $28 \text{ }^\circ\text{C}$, а в'язкість залежала від швидкості зсуву, описаної рівнянням (2.1), і дорівнювала $30 \text{ Па}\cdot\text{с}$ для динамічної в'язкості тіста;
- швидкість обертання замішувального робочого органу була встановлена на рівні 180 об/хв , а ємності – на рівні 30 об/хв ;
- об'єм тіста був розділений на обчислювальну сітку, що складалася з неструктурованої трикутної мережі з 145210 вузлами, 644088 елементами і 6103203 гранями;
- симуляція тривала 300 секунд, аналізуючи 3 позиції замішувального робочого органу за секунду; результати симуляції показані на рис. 2.3.

Значення вихрової в'язкості, отримане у тривимірному моделюванні (рис. 2.3) для двох геометрій замішувальних робочих органів, було введено в математичну модель для визначення моменту опору на замішувальних робочих органів. Математична модель використовує як вихідну точку рівняння для визначення в'язкості за допомогою обертового віскозиметра з коаксіальними циліндрами. Замішувальні робочі органи, як спіральні, так і прямі, мають обертальний рух навколо своїх вертикальних осей усередині чаші замішувача,

причому весь механізм розміщений у тривимірній декартовій системі. Чаша обертається навколо своєї осі у протилежному напрямку до змішувальних робочих органів.

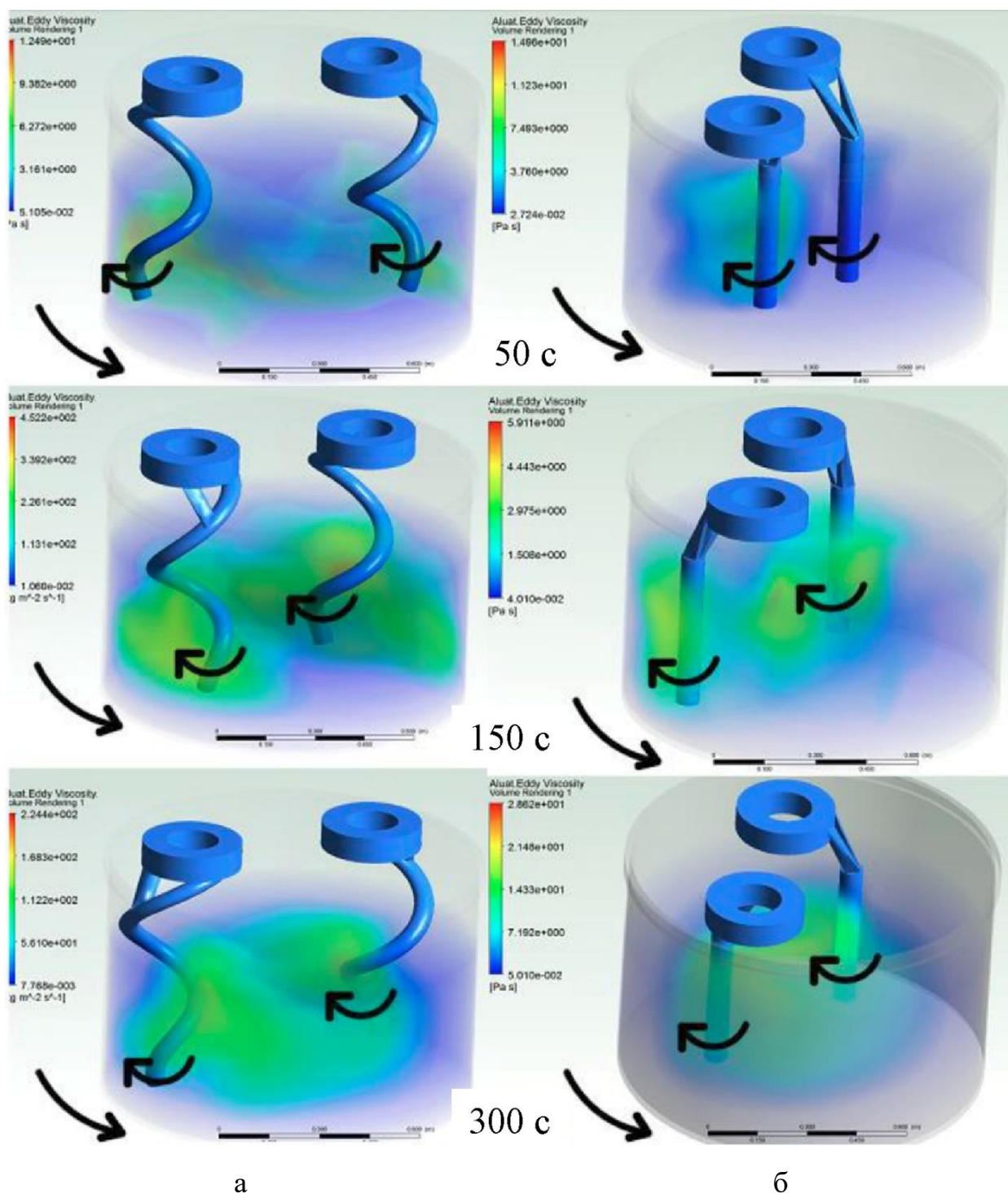


Рисунок 2.3 – Вихрова в'язкість для двох моделей при 30 с, 150 с і 300 с часу змішування: а – спіральний змішувальний робочий орган; б – прямий змішувальний робочий орган

Швидкість обертання змішувальних робочих органів складає 3 об/с, що означає, що вони тричі наближаються до стінки чаші на максимальну відстань. У цьому положенні момент опору на змішувальних робочих органів є максимальним, і математична модель застосовується лише для цієї ситуації.

На рис. 2.4 представлена геометрія змішувальних робочих органів, де r_2 – це відстань між центром обертання змішувального робочого органу та чашею, а r_1 – радіус, на якому вимірюється момент опору на змішувального робочого органу. Наведені значення для змішувальних робочих органів: $r_1 = 0,24$ м; $r_2 = 0,25$ м; $h = 0,5$ м; $\omega_{r1} = 18,84$ рад/с; $\omega_{r2} = 18,84$ рад/с; $\omega_b = 2,09$ рад/с. Для спірального змішувального робочого органу також є кут $\alpha = \cos(45^\circ) = 0,525$, який представляє нахил змішувального робочого органу відносно осі чаші.

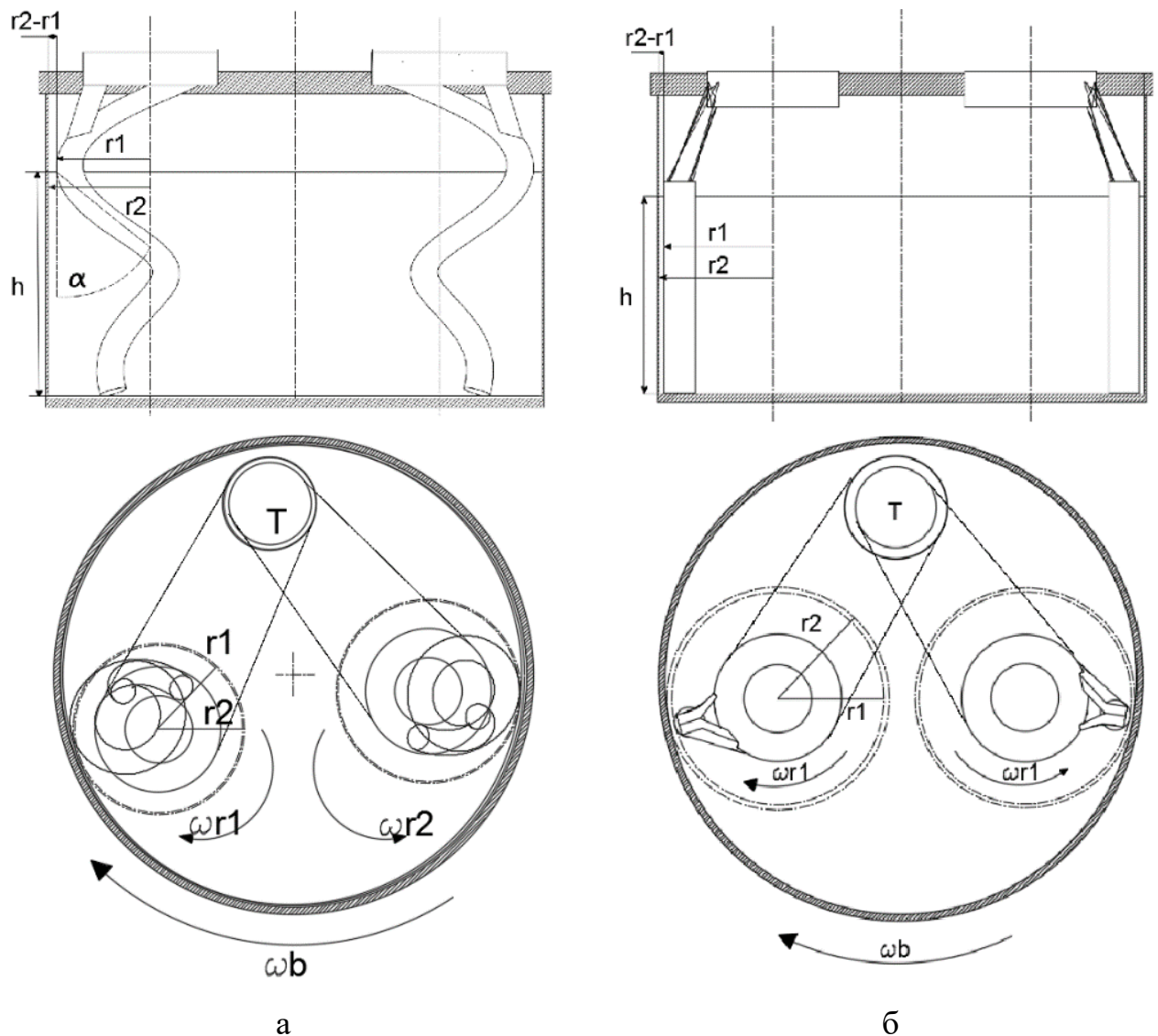


Рисунок 2.4 – Геометрія змішувального робочого органу: а – спіральна, б – пряма

Відношення між дотичним напруженням і швидкістю зсуву для неньютонівських рідин є нелінійним, і значення в'язкості змінюються зі швидкістю зсуву. В'язкість визначається як відношення дотичного напруження до швидкості зсуву, як показано у рівнянні (2.3):

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2.3)$$

Математичний вираз для дотичного напруження:

$$\tau = \frac{T}{2\pi r^2 h} \quad (2.4)$$

де r – радіус, на якому вимірюється момент опору на замішувального робочого органу, T – момент опору на замішувального робочого органу, h – глибина занурення робочого органу в масу тіста.

Швидкість зсуву розраховується за наступним рівнянням:

$$\gamma = \frac{\omega_r \bar{r}}{r_2 - r_1} \quad (2.5)$$

де ω – кутова швидкість замішувального робочого органу, r – середній радіус між r_2 та r_1 .

У віскозиметрі з коаксіальними циліндрами в'язкі сили всередині рідини призводять до утворення зсувної сили, що вимірюється за допомогою датчика моменту на внутрішньому циліндрі. В'язкість матеріалу можна виміряти, використовуючи момент опору на замішувального робочого органу та швидкість обертання.

В'язкість для ньютонівських матеріалів може бути розрахована за наступною формулою:

$$\eta = \frac{T}{4\pi h\omega} \left(\frac{1}{r_2^2} - \frac{1}{r_1^2} \right) \quad (2.6)$$

Рівняння (2.6) також відоме як рівняння Маргулеса і загалом застосовується для ньютонівських рідин. Крива для змін в'язкості може бути визначена як відношення дотичного напруження до швидкості деформації.

Для застосування вищенаведених співвідношень було введено поняття представницького радіуса R_r як функції геометрії замішувального робочого органу та чаші, яке розташоване на контактних ділянках (зонах максимального наближення) між чашею та замішувальним робочим органом. Вираз має наступне рівняння:

$$R_r = R_1 \left\{ \frac{(2\beta^2)}{(1+\beta^2)} \right\}^{1/2} = R_2 \left\{ \frac{(2\beta^2)}{(1+\beta^2)} \right\}^{1/2} \quad (2.7)$$

$$\text{де } \beta = \frac{r_2}{r_1} = \frac{0,26}{0,25} = 0.065 \text{ м.}$$

Оскільки чаша має обертальний рух як у симуляції, так і в наступних експериментах, результуюча кутова швидкість може бути розрахована як: $\omega_t = \omega_a - \omega_v$. Швидкість обертання робочого органу становить 180 об/хв, а чаші – 20 об/хв для обох замішувачів. Результуюча кутова швидкість дорівнює $\omega_t = 16,74$ рад/с.

Оскільки швидкість зсуву на представницькому радіусі R_r не залежить від типу рідини, представницька швидкість зсуву дорівнює:

$$\dot{\gamma}_R = \omega \left\{ \frac{[\beta^2+1]}{[\beta^2-1]} \right\} \quad (2.8)$$

Рівняння для в'язкості, в якому введено представницький радіус, якщо поділити рівняння (2.4) на рівняння (2.8), стає:

$$\eta = \eta_r = \frac{\tau_r}{\dot{\gamma}_r} = \frac{T}{\omega} \left(\frac{\beta^2 - 1}{4\pi\beta^2 r_1^2 h} \right) \quad (2.9)$$

Момент можна обчислити, використовуючи рівняння (2.4), (2.5) та (2.7), якщо відома динамічна в'язкість.

Момент опору на прямому замішувальному робочому органі розраховується за наступним виразом:

$$T = \frac{\omega_t \eta}{\left(\frac{\beta^2 - 1}{4\pi\beta^2 r_1^2 h} \right)} \quad (2.10)$$

Момент опору на спіральному замішувальному робочому органі розраховується за наступним виразом:

$$T = \frac{\omega \eta}{\left(\frac{\beta^2 - 1}{4\pi\beta^2 r_1^2 h \cos 45^\circ} \right)} \quad (2.11)$$

де $\omega_t = 16,74$ рад/с, $r_1 = 0,24$ м, $\beta = 1,083$ м, $h = 0,5$ м та $\eta = Ns/m^2$.

Використовуючи ці дані та геометрію, що була використана для математичного моделювання, як показано на рис. 2.4, можна описати динамічний розвиток моменту опору на замішувальних робочих органах.

2.3 Результати чисельного моделювання

Розвиток турбулентної в'язкості в усій масі тіста можна спостерігати на рисунку 2.3. Миттєві значення були зафіксовані для обох геометрій замішувальних робочих органів на 30, 150 і 300 с відповідно. Результати показують, що значення кривих для опору моменту, створеного прямими замішувальними робочими органами, є більшими, ніж у випадку спіральних робочих органів. Це пояснюється

специфічною енергією, що вводиться в тісто: у випадку спіральних робочих органів кількість енергії, що вводиться в одиницю часу, є меншою.

Важливим аспектом є контакт тіста із замішувальними робочими органами, який має прямий вплив на розвиток тіста через специфічний рух тіста під час замішування та збільшення в'язкості з часом. Під час замішування зі спіральними робочими органами тісто поступово захоплюється в нижній частині, і контакт тіста із замішувальними робочими органами зменшується.

У випадку прямих робочих органів контакт із тістом відбувається на всій поверхні, і зі зростанням значень в'язкості більша маса тіста захоплюється в обертовий рух навколо замішувальних робочих органів.

Різниця у значеннях в'язкості між двома проаналізованими випадками замішування показана на рисунку 2.5. Прямі робочі органи переміщують і захоплюють більшу кількість тіста, ніж спіральні. Розподіл векторів швидкості в шарах тіста є рівномірним у випадку замішування прямими замішувальними робочими органами.

Результати на рис. 2.5 показують, що у випадку замішування зі спіральними робочими органами швидкість у центральній зоні досягає максимального значення 2,75 м/с і є помітно вищою, ніж швидкість в інших шарах тіста. У випадку прямих робочих органів швидкість всередині шарів тіста досягає максимального значення 4,71 м/с на значно розширеній площі в усій масі тіста.

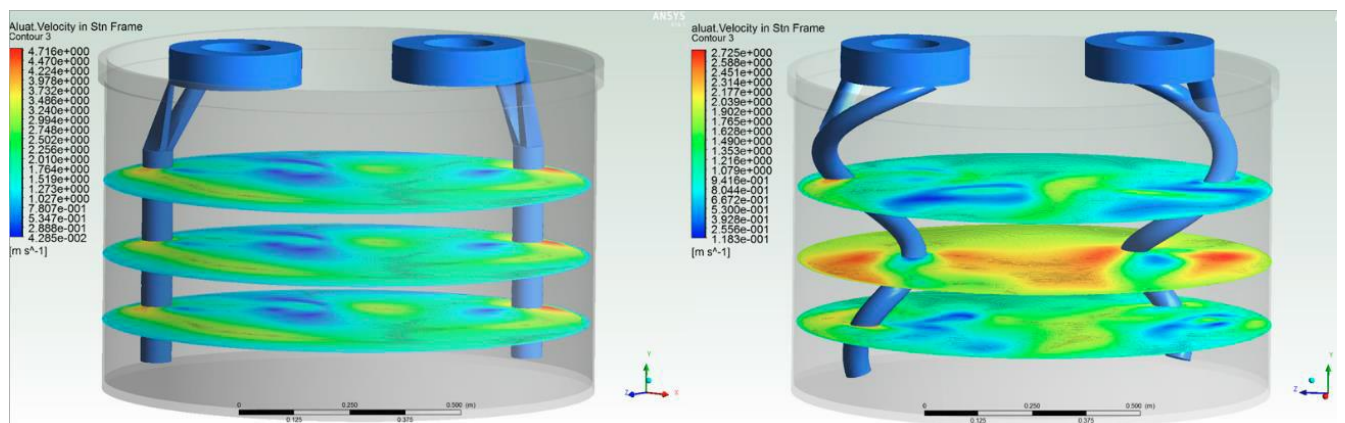


Рисунок 2.5 – Тривимірна симуляція процесу замішування тіста, що показує відмінності в розвитку при використанні різних геометрій замішувальних робочих органів; момент після 150 секунд симуляції

В'язкість безпосередньо залежить від консистенції тіста. Вимірюючи значення в'язкості під час процесу замішування, можна співвіднести отриману криву розвитку з кривою консистенції. Після 150 с симуляції максимальні значення в'язкості в певних областях у моделюванні замішування прямими робочими органами втричі більші, ніж у випадку спіральних робочих органів. Це можна пов'язати з швидшим розвитком глютенної сітки та більшим розтягуванням і стисканням тіста під час замішування прямими робочими органами.

Через збільшене введення специфічної енергії за одиницю часу в'язкість тіста у випадку замішування прямими робочими органами швидко зростає, але при продовженні замішування швидкість деформації перевищує межу стійкості глютенної сітки, і еластичність тіста поступово зменшується. На рис. 2.6–2.7 показано розподіл швидкості деформації для всіх 40365 вузлів на 30-й та 300-й секундах симуляції замішування для обох типів замішувальних робочих органів. Деформації, які відбуваються всередині тіста, відрізняються між шарами того самого тіста та між двома моделями замішування. Відносний рух шарів зростає біля поверхні робочих органів, і значення градієнтів швидкості більші.

Результати цього аналізу показують невелике зниження швидкості деформації наприкінці процесу замішування для випадку зі спіральними робочими органами в порівнянні з прямими, де швидкості деформації зменшуються вдвічі в деяких зонах.

Наступні рисунки демонструють симуляцію розвитку глютенної сітки під час замішування з прямими робочими органами (рис. 2.8) та спіральними (рис. 2.9). Глутенова сітка починає швидко формуватися навколо замішувальних робочих органів, оскільки специфічна енергія, що вводиться в тісто, є вищою в цій зоні. Приблизно на 240-й секунді замішування з використанням прямих робочих органів (рис. 2.8) висота тіста досягає максимального значення, що можна віднести до точки максимальної консистенції. Після цієї точки висота тіста поступово зменшується через прискорене зменшення в'язкості. Якісні властивості тіста постійно погіршуються до кінця часу замішування.

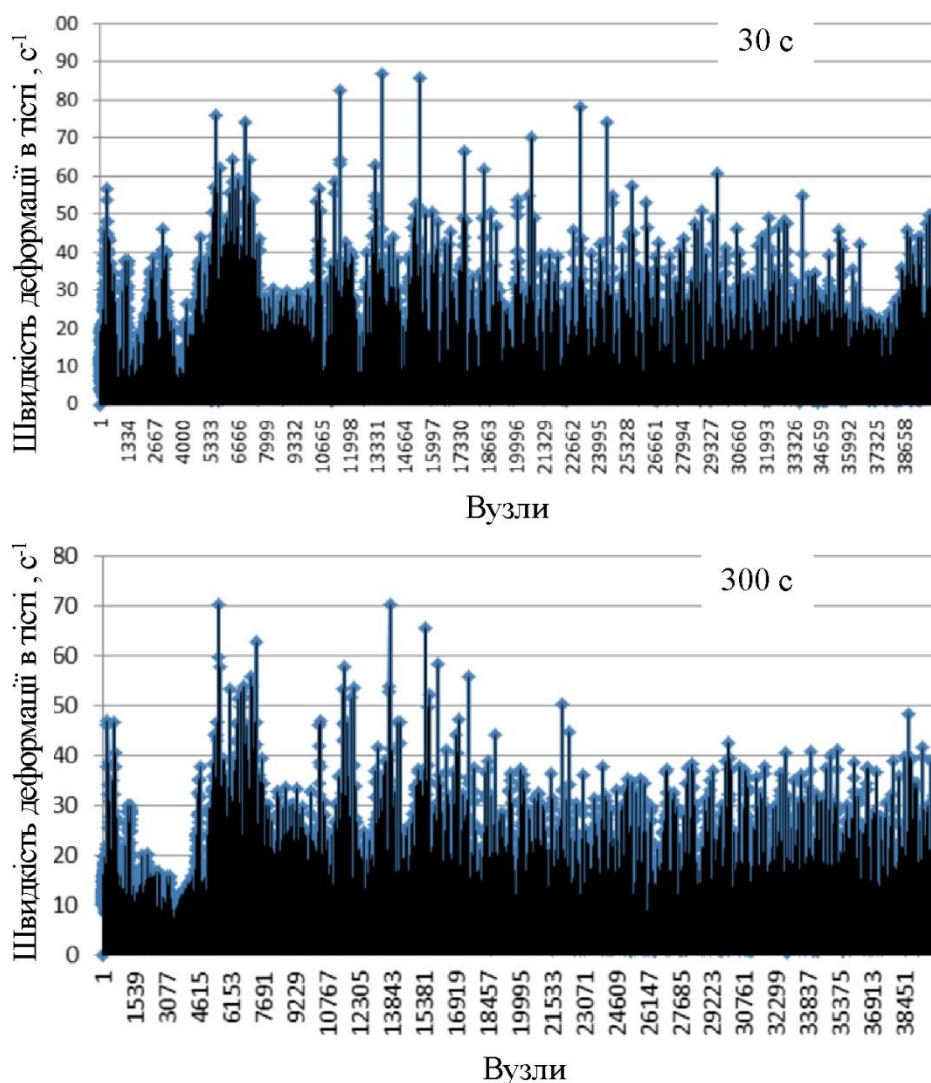


Рисунок 2.6 – Розподіл швидкості деформації в тісті після 30 та 300 с для спіральних робочих органів

На рис. 2.9 можна спостерігати, що розвиток тіста з використанням спірального замішувача є поступовим і постійним процесом до 360-ї секунди, що відзначено масовим скупченням тіста навколо замішувальних робочих органів. Після цієї точки значення в'язкості зменшуються, і маса тіста має тенденцію займати весь об'єм ємності. Стійкість тіста на замішувальних робочих органах швидко знижується. Результати цієї симуляції дають змогу оцінити протидіючу силу на замішувальних робочих органах та оцінити енергоспоживання.

Можна визначити момент, коли тісто досягає оптимального розвитку. Тісто демонструє різний розвиток залежно від геометрії замішувальних робочих органів. Симуляція підтверджує результати, отримані з вимірянних даних в реальному часі.

Згідно з симуляцією, значення в'язкості були вищими для тіста, замішуваного з прямими робочими органами, ніж для тіста, замішуваного зі спіральними. Діаграми моменту, отримані з системи SOPF, показали схожі результати.

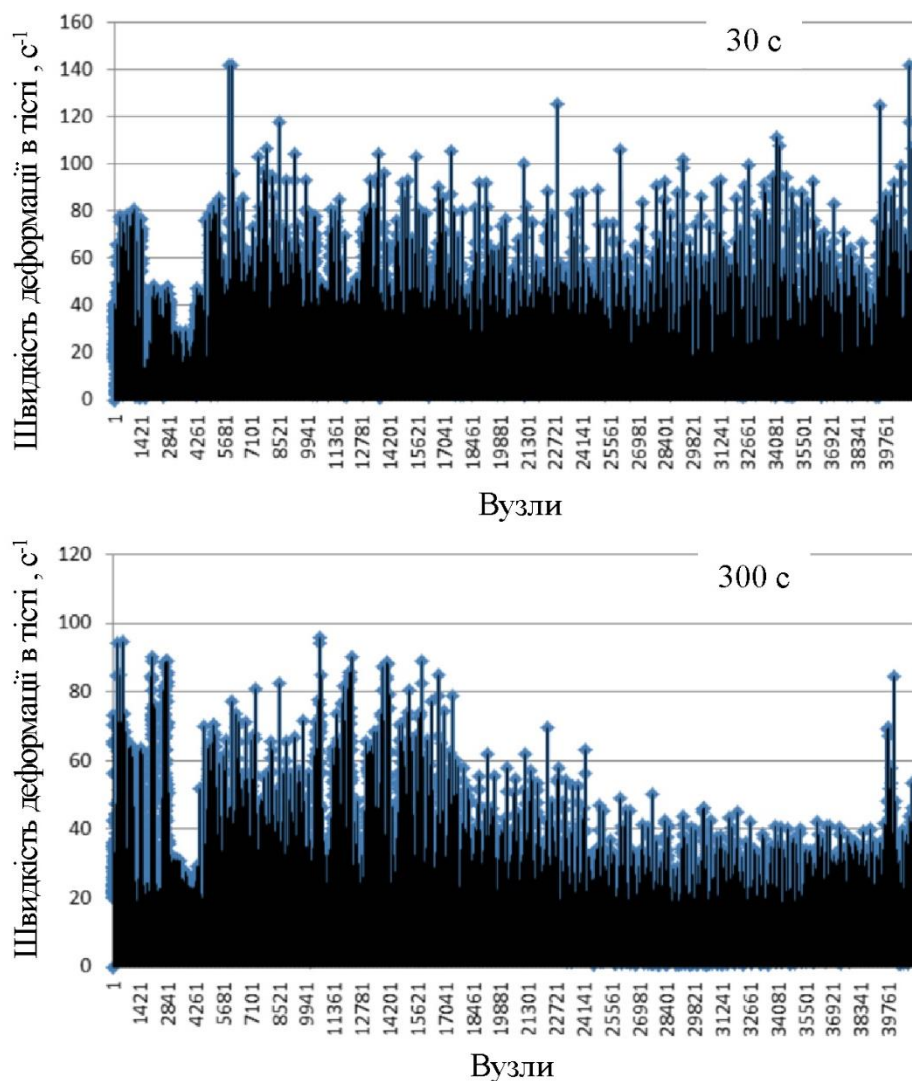


Рисунок 2.7 – Розподіл швидкості деформації в тісті після 30 та 300 с для прямих робочих органів

У табл. 2.1 наведено 20 значень в'язкості, отриманих через 15 с для двох проаналізованих випадків замішування.

Ці значення були введені в запропоновану математичну модель для обчислення опору моменту, зареєстрованого обома замішувачами, використовуючи методи обчислювальної гідродинаміки (CFD), а згодом порівняні зі значеннями опору моменту, отриманими з системи SOPF.

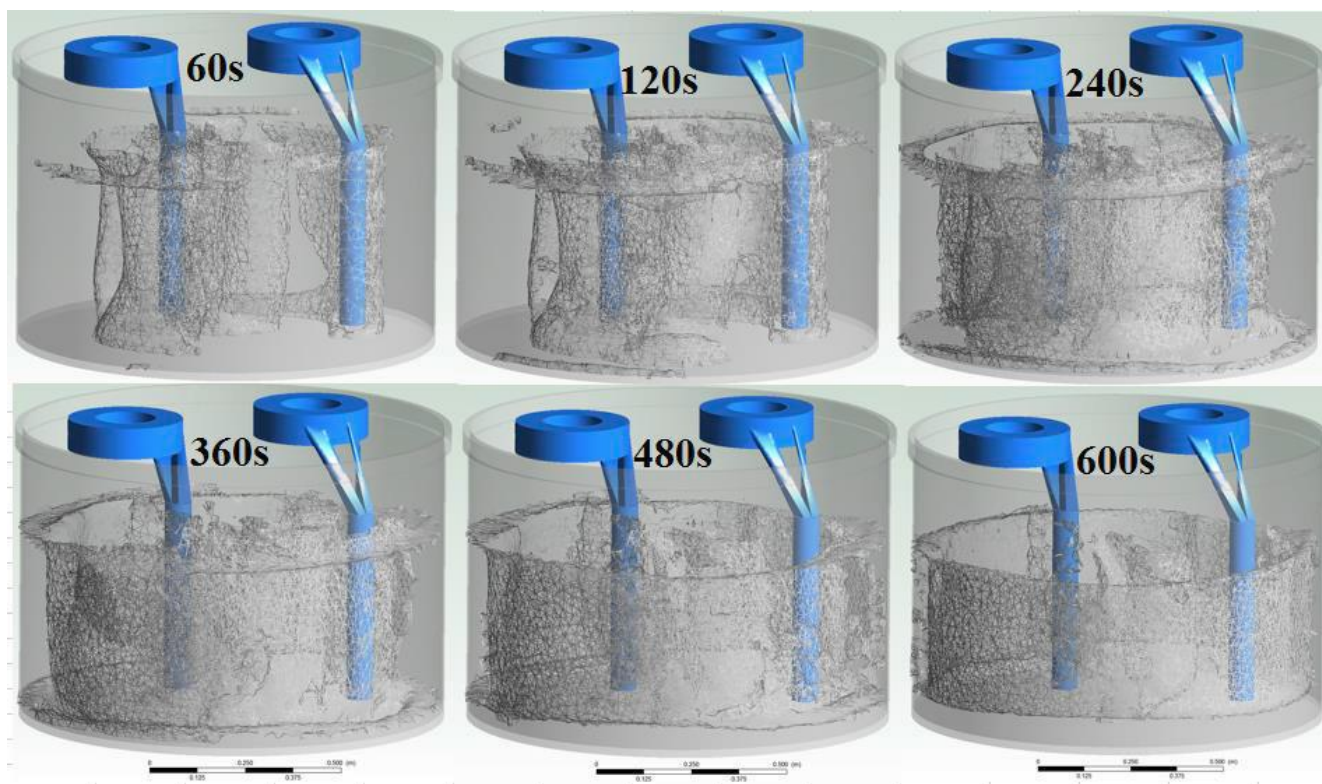


Рисунок 2.8 – Імітація розвитку тіста при замішуванні з прямими замішувальними робочими органами

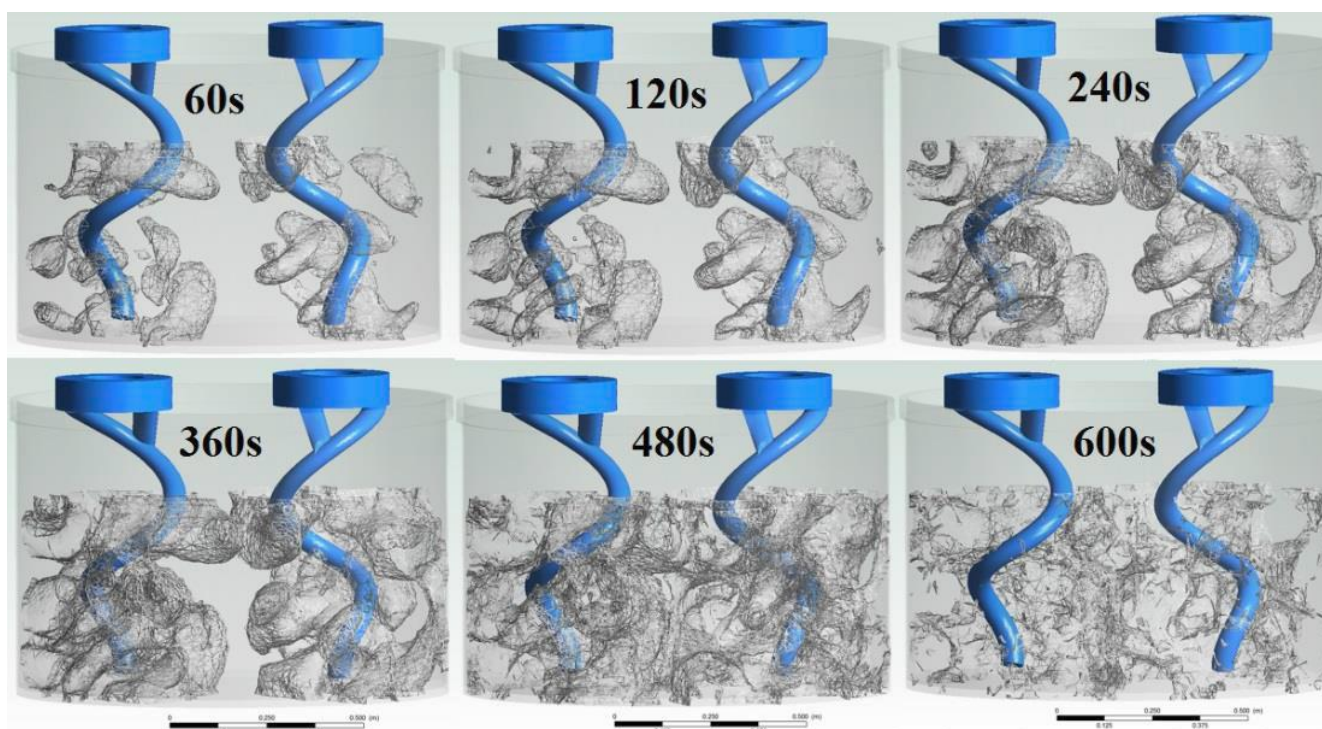


Рисунок 2.9 – Імітація розвитку тіста при замішуванні з спіральними замішувальними робочими органами

Таблиця 2.1 – Значення в'язкості, отримані в 3D-симуляції, використані для розрахунку значень опорного крутного моменту на лопатях для замішування

Час, с	Спіральні робочі органи			Прямі робочі органи		
	В'язкість η , Па·с	Крутний момент CFD, Н·м	Крутний момент SOPF, Н·м	В'язкість η , Па·с	Крутний момент CFD, Н·м	Крутний момент SOPF, Н·м
15	2,97	129,2	99	6,00	261,1	55
30	11,19	486,9	365	16,6	725,5	410
45	13,86	603,2	455	17,2	748,6	820
60	19,7	857,4	980	18,3	796,4	1105
75	22,6	986,7	1060	18,7	813,9	1210
90	24,0	1044,4	1100	22,4	974,9	1315
105	24,7	1077,2	1150	23,1	1005,4	1410
120	25,5	1111,6	1175	27,7	1205,6	1630
135	26,1	1137,5	1188	34	1479,8	1720
150	26,6	1159,0	1173	41,5	1807,1	1760
165	26,3	1146,1	1158	40,4	1758,3	1700
180	25,7	1120,3	1120	39,6	1723,5	1650
195	24,5	1068,6	1072	37,8	1645,2	1645
210	24,1	1051,3	1070	33,4	1453,7	1550
225	23,7	1032,2	1063	29,3	1275,2	1435
240	23,7	1034,1	1055	27,3	1188,2	1324
255	23,7	1034,1	1035	26,2	1140,3	1246
270	23,5	1026,4	1020	24,3	1057,6	1232
285	23,3	1016,8	960	23,7	1031,5	1170
300	23,3	1014,9	945	22,4	978,8	1078

Сума опору моменту на замішувальному робочому органі для обох випадків замішування була отримана шляхом застосування математичної моделі, в яку були введені значення в'язкості. Ці значення порівнювалися з даними, зареєстрованими системою SOPF в реальному часі. Отримані графіки варіацій для значень опору моменту показані на рис. 2.10. Аналізуючи наявні дані, можна сформулювати такі спостереження: збільшення опору моменту залежить від збільшення в'язкості тіста.

Інтенсивний, прискорений розвиток тіста, як видно при замішуванні з прямими робочими органами, також пришвидшить процес погіршення властивостей тіста. У вивченому випадку час замішування для тіста, що розвивається з прямими робочими органами, слід зменшити на 30 % при

використанні одного й того ж рецепту та умов виробництва. Оскільки специфічна енергія, що вводиться в тісто, має більші значення на одиницю часу у випадку замішування з прямими робочими органами, діаграма опору моменту також має вищі значення, ніж у іншому випадку.

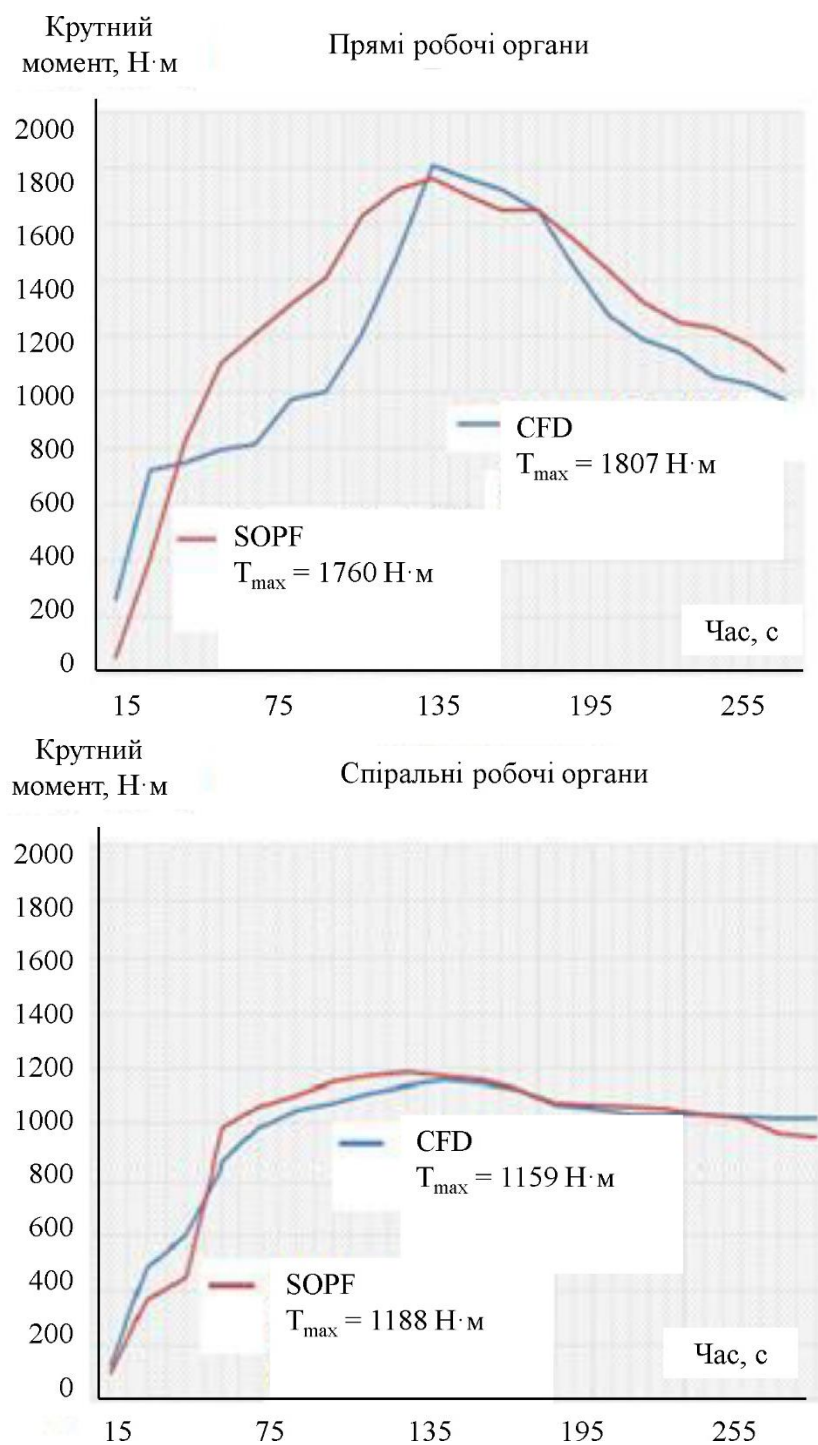


Рисунок 2.10 – Варіація опорного крутного моменту для двох замішувачів

Різниця між діаграмами замішування також чітко показана і зумовлена

впливом геометрії замішувального робочого органу на розвиток тіста.

Висновки за розділом

Приблизно 70 % існуючих машин для замішування, які використовують у всьому світі, мають вертикальні лопаті для замішування зі спіральною геометрією, і значні відмінності можна знайти не тільки між різними геометріями лопатей замішувача, а й між однаковими типами замішувачів від різних виробників. Геометрія лопаті замішувача має велике значення через вплив, який вона має на розвиток тіста та його реологічну поведінку, яка постійно змінюється протягом усього процесу виготовлення хліба.

Отримані результати в 3D-симуляції та результати, отримані з математичної моделі, запропонованої в цьому розділі, є дуже схожими на результати експериментальних вимірювань. Хоча спіральний робочий орган має більшу площу охоплення, ніж пряма лопать, завдяки куту 45° від стінки діжі, вона обробляє меншу масу тіста, і зусилля зрізу також менші. Геометрія робочого органу замішувача та загальна продуктивність замішувача мають величезний вплив на розвиток тіста та його реологічну поведінку. Розуміння цього аспекту є надзвичайно важливим, особливо при придбанні нового обладнання, яке має оптимально служити виробничому процесу.

Процес замішування можна оптимізувати за рахунок точного контролю часу замішування, що корелює з оптимальним розвитком тіста, що може бути визначено з інтерпретації математичної моделі, яка в основному використовує геометрію лопаті замішувача та розміри діжі.

З використанням тривимірної симуляції та математичного моделювання можливо визначити точний вплив геометрії робочого органу замішувача на реологічну, кінематичну та динамічну поведінку тіста під час процесу замішування та на подальших етапах виробництва.

За допомогою пакета 3D-симуляції Star-CCM+ можна дослідити розподіл зусиль зрізу всередині тіста під час замішування. Отримані результати можуть бути корисними для редизайну обладнання для замішування з використанням 3D-симуляцій та з урахуванням індивідуальних рішень, які відповідають потребам ринку. Запропонована математична модель дає змогу отримати уявлення про процес замішування,

передбачаючи реологічну поведінку тіста, на яку впливає геометрія робочих органів змішувача.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Постановка задачі

Мета експериментальних досліджень полягала в аналізі та оптимізації процесу замішування з використанням спіральних робочих органів.

Специфічні цілі цього дослідження полягали в:

- оцінці характеристик замішування пшеничного тіста з використанням звичайного замішувача та підключених спіральних робочих органів;
- визначенні оптимальної кількості доданої води в тісто для конкретної промислової лінії для виробництва хліба в порівнянні з рекомендованою фаринографом;
- оцінці впливу різних кількостей накопиченої специфічної енергії, введеної в тісто, шляхом порівняння об'ємів готового продукту;
- аналізі записаних даних для встановлення оптимального процесу замішування для хлібопекарні.

3.2 Методика експериментальних досліджень

Для експериментальних досліджень використовували борошно пшеничне вищого сорту ТМ «Хуторок» (виробництво 2024 р.). Лабораторний аналіз показав 61 % водопоглинання, 1,9 хв часу розвитку та 3,1 хв часу стабільності (рис. 3.1), використовуючи фаринограф.

Для процесу замішування використовували наступне обладнання: промисловий тістоміс з подвійним замішувальним робочим органом (рис. 3.2) і змінною швидкістю (0–150 об./хв), до якого було підключено систему для оптимізації процесу замішування під назвою SOPF, електричний трансдуктор інтенсивності струму та два клапани для контролю вивантаження інгредієнтів.

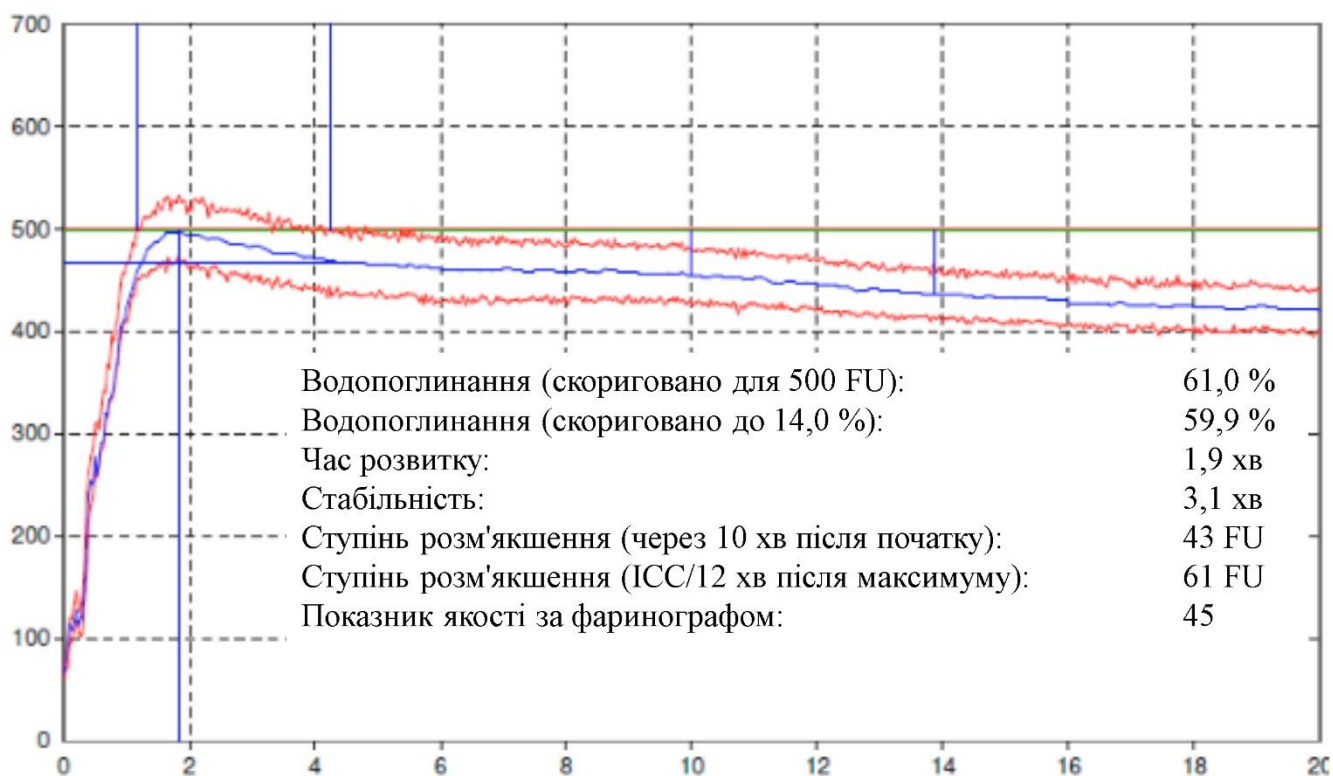


Рисунок 3.1 – Аналіз борошна пшеничного вищого сорту ТМ «Хуторок»



Рисунок 3.2 – Промисловий тістоміс з подвійним замішувальним робочим органом

На рис. 3.3 представлено логічну схему системи SOPF, яка має інтегровану систему збору та обробки даних (11) і вимірює струм за допомогою перетворювача напруги (10), який споживає двигун, що приводить у рух замішувальний робочий орган (4), і двигун, що обертає діжу тістоміса, щоб контролювати процес

замішування шляхом зупинки тістоміса за допомогою двох електричних реле (9). Пристрій визначає оптимальну консистенцію (точку встановлення енергії) і відображає її на сенсорному екрані (12) у вигляді діаграми замішування та зупиняє тістоміс, коли використовувана введена енергія, накопичена за кожен секунду замішування, досягає заздалегідь встановленого значення (вважається оптимальним). Через екран (12) оператор може встановити рецепт роботи, який складається з кількості кілограмів замісу, точки встановлення енергії, мінімального часу замішування та лінії безпеки (3), нижче якої процес замішування є помилковим, і тісто не можна використовувати належним чином у процесі.

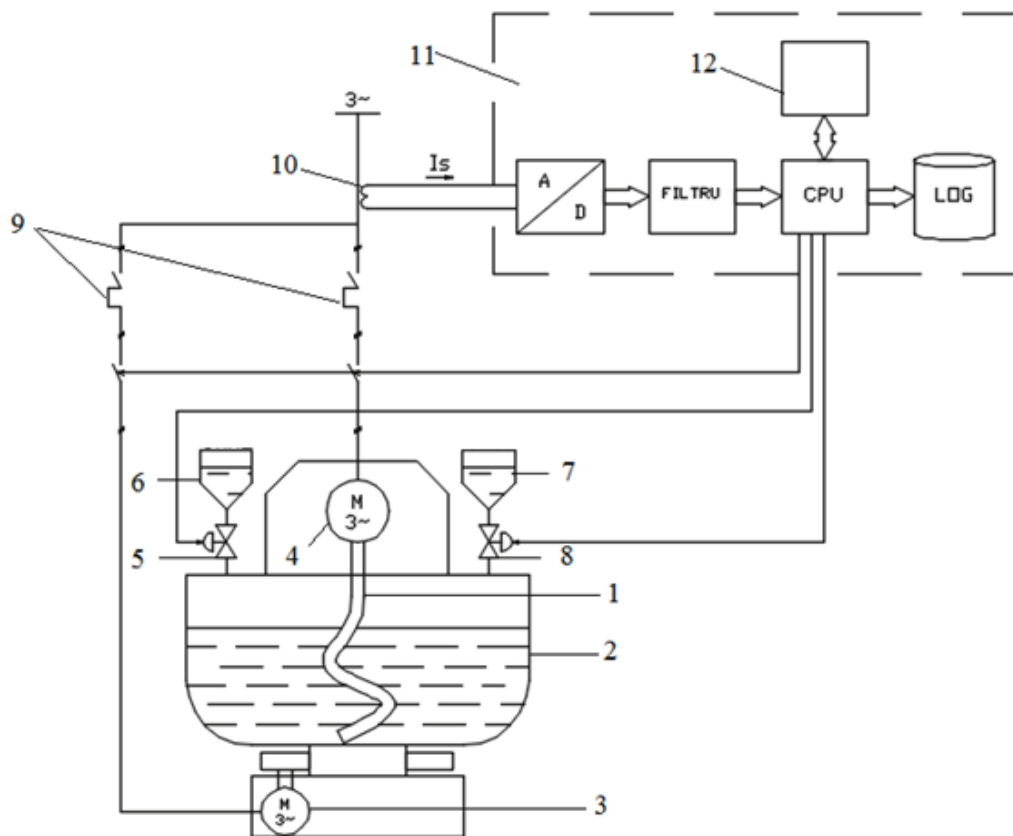


Рисунок 3.3 – Схема системи SOPF, підключеної до промислового тістоміса

На рис. 3.4 показано, як передається питома енергія в тісто. Доступні системи контролюють процес замішування з кроком часу в одну секунду для введення питомої енергії. Процес замішування зупиняється, коли досягнуто заданого значення питомої енергії, незалежно від часу та розвитку тіста. У багатьох випадках процес замішування буде зупинений раніше, ніж тісто досягне належного

розвитку. Можна контролювати процес замішування, обчислюючи площу під кривою замішування, описану питомою енергією, яка моніториться та реєструється щосекунди. Процес замішування зупиняється, коли тісто оптимально розвинуте та досягає накопиченої питомої енергії.

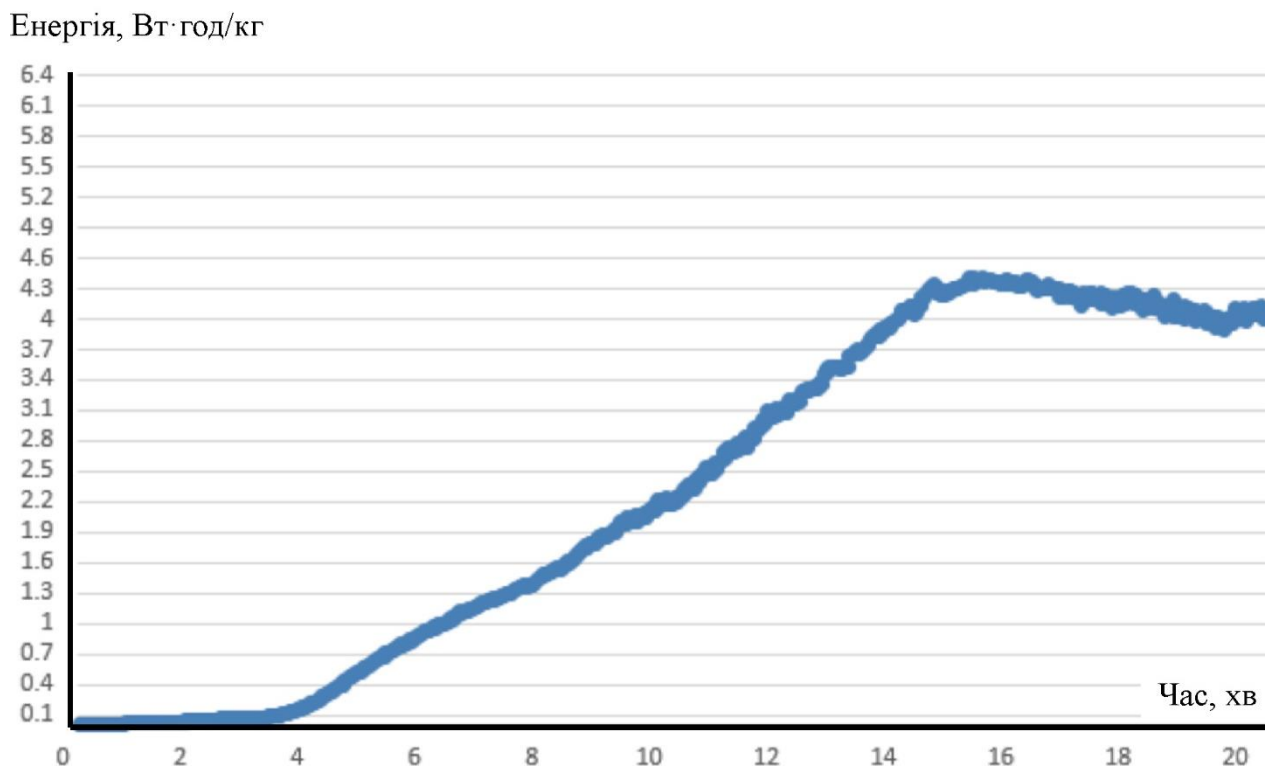


Рисунок 3.4 – Передача енергії в тісто

Рис. 3.5 показує діаграму замішування, яка створена системою SOPF, яка також дозволяє оператору робити миттєві знімки: 1 – це крива, отримана з максимальними значеннями для енергетичної пари, 4 зображає мінімальні значення, 2 – крива, розроблена із середніми значеннями, 3 представляє лінію безпеки (мінімальну консистенцію, прийнятну для процесу випікання, де проводилися тести), а 5 – таблицю значень, таких як максимальне значення для енергетичної пари, розтяжність тіста (відстань між максимальною, мінімальною та середньою кривою в кінці часу замішування), а також значення миттєвої енергії та загальної енергії в кінці замішування, яке має збігатися з встановленою точкою.

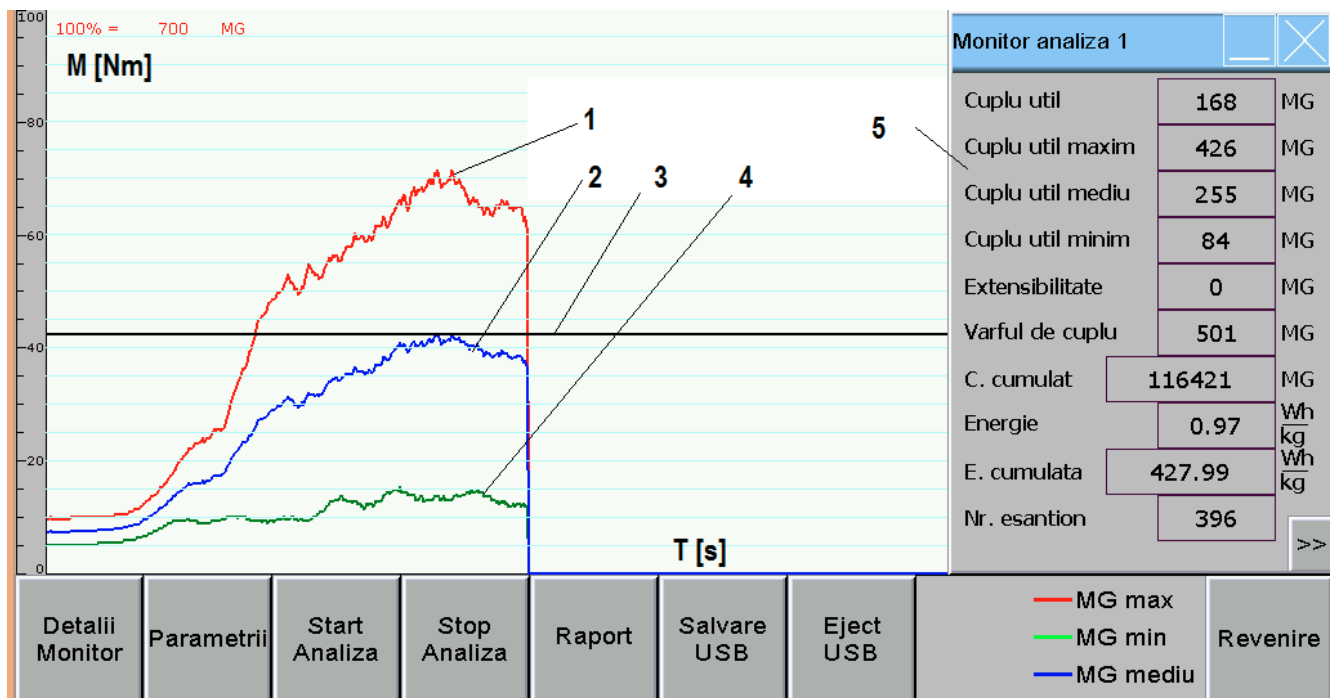


Рисунок 3.5 – Діаграма процесу замішування, розроблена системою SOPF

Для графічної діаграми процесу замішування, динамічного розвитку та інтерпретації даних пристрій використовує математичний алгоритм.

Виходячи з загальної формули для розрахунку необхідної потужності приводу на робочому органі при заданих обертах n (об/хв), її можна записати:

$$P = M_m \frac{\pi n}{30} \quad (3.1),$$

де: M_m – момент опору на замішувальному робочому органі, а P – відповідна потужність цього моменту.

Система SOPF вимірює електричний струм, споживаний двигуном замішувального робочого органу. Постійними вважаються наступні параметри: електричне напруження $U = 400$ В, коефіцієнт потужності $\Phi = 0,8$ та оберти замішувальних робочих органів вимірюються за допомогою обертового трансдюсера. Перед розрахунком моменту опору на замішувальному робочому органі вимірюється та виключається споживання струму двигуна без навантаження.

$$M = M_t - M_g \quad (3.2),$$

де: M_t – загальний момент опору на замішувальному робочому органі, розрахований за вимірами електричного струму, споживаного двигуном замішувального робочого органу під час процесу замішування; M_g – момент опору на замішувальному робочому органі при роботі без навантаження.

Нижче наведено приклад розрахунку для споживання 35 ампер (А) при обертах замішувального робочого органу 80 об/хв.

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi}{\frac{\pi \cdot n}{30}} = \frac{1,73 \cdot 400 \cdot 35 \cdot 0,8}{\frac{3,14 \cdot 80}{30}} = 2314,93 \quad (3.3)$$

Система SOPF використовує звичайні одиниці, називані MG; одна одиниця MG дорівнює 3 Н·м. Момент опору на замішувальному робочому органі стає:

$$M = \frac{2314,93}{3} = 771,64 [MG] \quad (3.4)$$

Енергія, спожита під час процесу замішування (E), визначається за наступною формулою:

$$E = P_m t_f = M_m \frac{\pi n}{30} t_f = \frac{S_n}{9,55} \quad (3.5)$$

При постійних обертах ($n = \text{const}$) споживана енергія залежить лише від площі під кривою замішування S: $E = f(S)$.

Специфічна енергія замішування ε може бути визначена за співвідношенням між спожитою енергією E та масою тіста Al_c :

$$\varepsilon = \frac{E}{Al_c} \quad (3.6)$$

Для вимірювання енергії, що вводиться в кожену секунду, використовували наступну формулу:

$$E = \frac{M \cdot \omega \cdot t}{M_d} \quad (3.7),$$

де: M – момент опору на замішувальному робочому органі (Н·м), ω – кутова швидкість (радіани/секунда), t – час замішування (секунди), а M_d – маса тіста (кг).

Попередні дослідження показали, що контроль за тістом за допомогою миттєвої специфічної енергії, введеної в тісто, використовуючи лише формулу, представлену вище, не задовольняє кожен процес замішування, особливо коли використовується борошно нижчої якості. Система SOPF контролює момент, коли замішування зупиняється, використовуючи накопичену специфічну енергію, введenu в тісто.

Сума енергії, що вводиться, вимірюється кожену секунду замішування і дорівнює інтегрованій сумі площ під кривою.

$$\sum_{k=1}^n E = E_1 + E_2 + E_3 \dots \dots \dots E_n \quad (3.8)$$

Використовуючи як еталонну величину площу під кривою замішування, описаною накопиченою специфічною енергією, система SOPF вводить таку ж кількість загальної енергії в тісто, замішуючи сильніші види борошна довший час, ніж слабші.

Рецептура тіста, використана у всіх його видах, складалася з: борошна – 112 кг, солі – 2,1 кг, розпушувача – 3,6 кг, покращувача – 1 кг, і доданої води (відповідно до кількості борошна) в межах від 52 % до 56 %. Час замішування було встановлено: 3 хв на першій швидкості (80 об/хв) і на другій швидкості (150 об./хв), 5 хв для тестів у першій частині, і змінний час для тестів у другій частині.

Було проведено п'ять тестів замішування з різною кількістю доданої води (від маси борошна), додаючи поступово 1 % у кожній партії. Аналізувалася поведінка тіста та його придатність для наступних етапів процесу виготовлення хліба, щоб визначити постійний час замішування, оптимальну кількість доданої води для відповідності процесу та отримання якісного кінцевого продукту.

Встановлено, що оптимальний відсоток доданої води, відносно борошна, становить 54 %.

Дані, записані за допомогою системи SOPF, були введені в програму Excel для порівняння зі стандартними аналітичними рівняннями (лінійним, степеневим, логарифмічним і експоненційним) з метою визначення, яка лінія тренду найкраще описує вплив кількості доданої води на консистенцію тіста.

Після встановлення описаних вище робочих параметрів було виконано чотири тести замішування на різних рівнях загального введення питомої енергії (280, 330, 380 і 450 Вт·год/кг), щоб оцінити, як вона впливає на об'єм готових виробів і визначити, який рівень питомої енергії, введеної в тісто, найкраще підходить для технологічного процесу, де проводилися тести. З кожної партії випадковим чином відбирали 10 зразків хліба для порівняння об'єму.

Результати тестів були введені в аналіз ANOVA, що надається програмою Excel.

3.3 Результати експериментальних досліджень

Рис. 3.6 представляє 5 партій замішування з використанням різних кількостей доданої води, при цьому всі інші робочі параметри залишаються незмінними для точності даних. Пік, зареєстрований для кожної партії, має знижені значення моменту опору на замішувальний робочий орган, що вказує на прогресивне зменшення консистенції. Це краще показано на рис. 3.7, де значення для кожного піку були внесені в трендову лінію, використовуючи програму Excel. Аналізуючи отримані значення пікових моментів у кожній партії з різними кількостями води, можна сказати, що для типу замішувача, що використовувався, найкращою трендовою лінією є степенева, з $R^2 = 0.99$, функція, яка не виражає прямої пропорції між кількістю доданої води та консистенцією тіста.

Оскільки найважливішим елементом у процесі хлібопечення є кінцевий продукт, порівнювалися ті, що отримані з використанням різних кількостей

накопиченої специфічної енергії, введеної в тісто, з точки зору об'єму. Значення, отримані для об'єму зразків хліба, можна побачити в табл. 3.1. У табл. 3.2 можна спостерігати результати ANOVA-аналізу. ANOVA-аналіз показує значні відмінності між об'ємами хліба, отриманими на різних рівнях накопиченої енергії, введеної в тісто. Різниці між об'ємами хліба однієї партії можна віднести на рахунок випадкових помилок у системі хлібопечення, які можна нехтувати, оскільки їхній вплив занадто малий, щоб суттєво вплинути на якість проведених експериментів.

Таблиця 3.1 – Зміна об'єму хліба при різних рівнях накопиченої енергії, введеної в тісто

Об'єм хліба / Загальна специфічна енергія	280 Вт·год/кг	330 Вт·год/кг	380 Вт·год/кг	450 Вт·год/кг
см ³ /100 г	533	551	587	543
	531	536	567	545
	546	570	571	540
	531	568	582	546
	543	561	571	551
	539	564	571	539
	541	561	571	540
	543	563	553	544
	536	551	586	545
	541	559	571	546

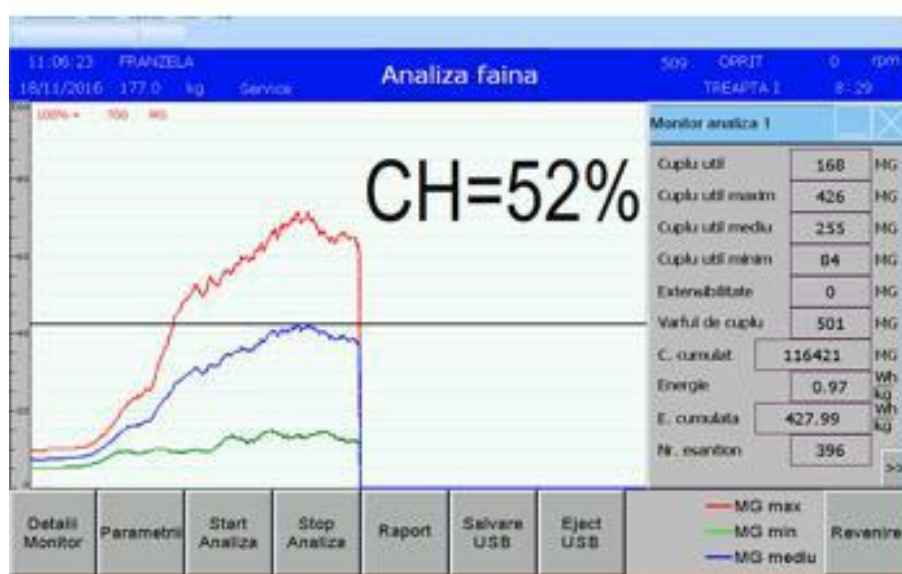


Рисунок 3.6 – Криві замішування з різними кількостями води, від 52 % до 56 %

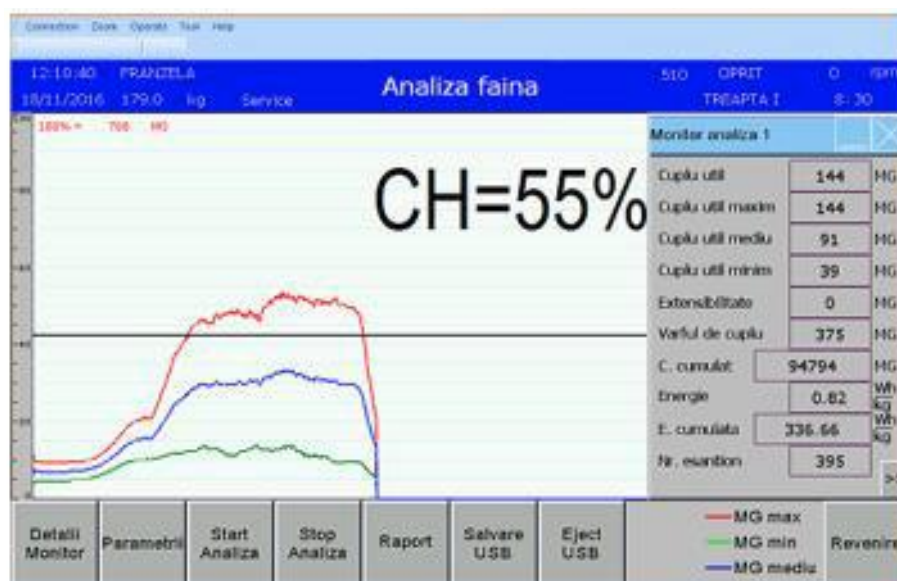
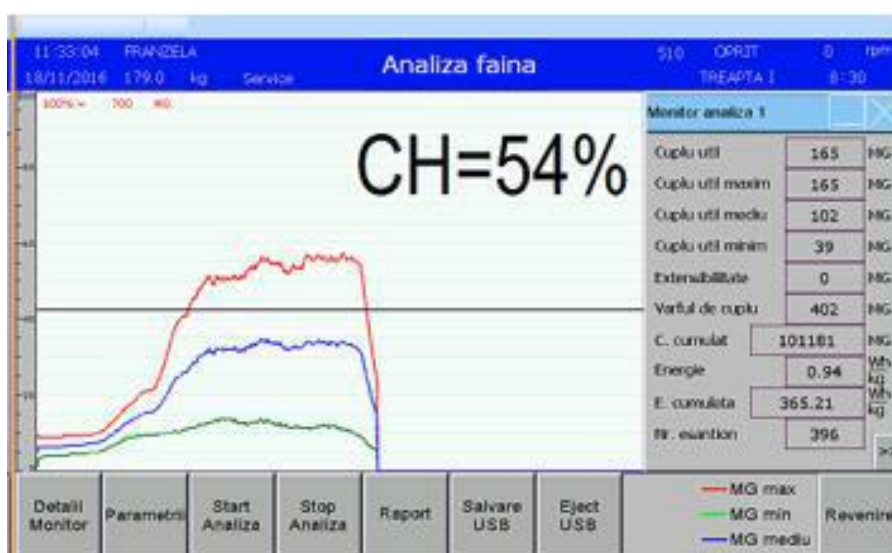
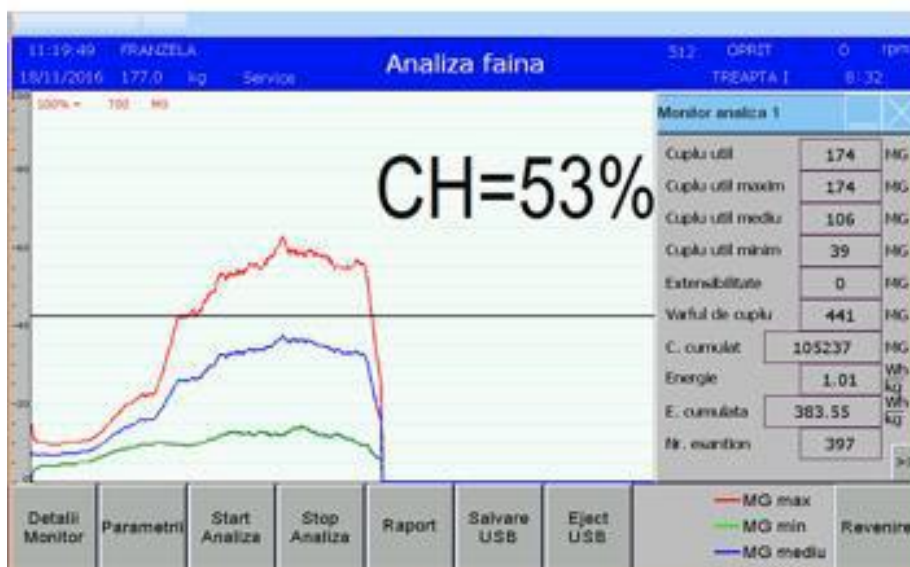


Рисунок 3.6 – Криві замішування з різними кількостями води, від 52 % до 56 %
(продовження)

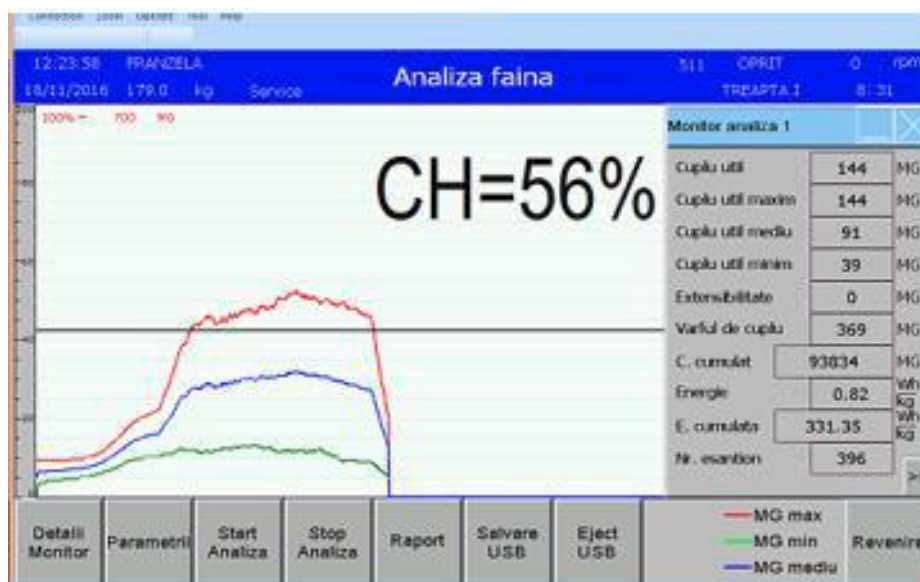
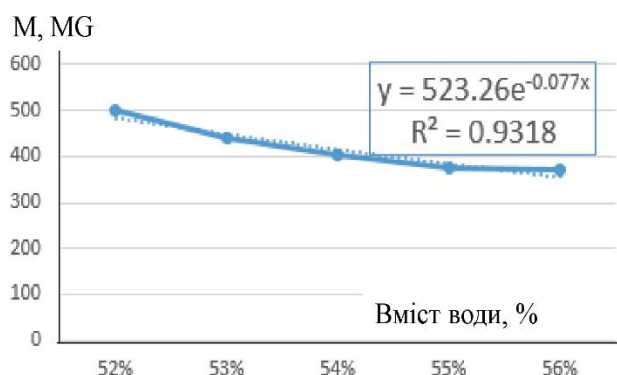
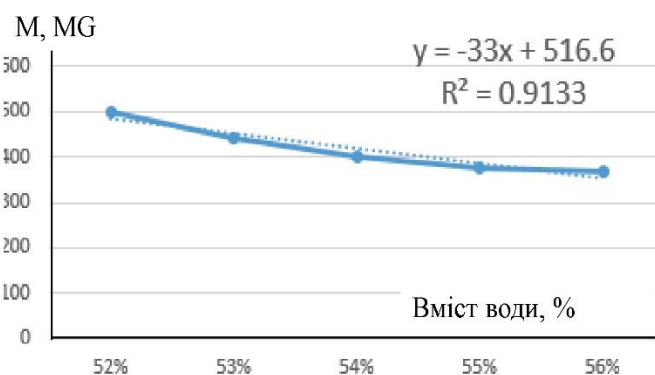


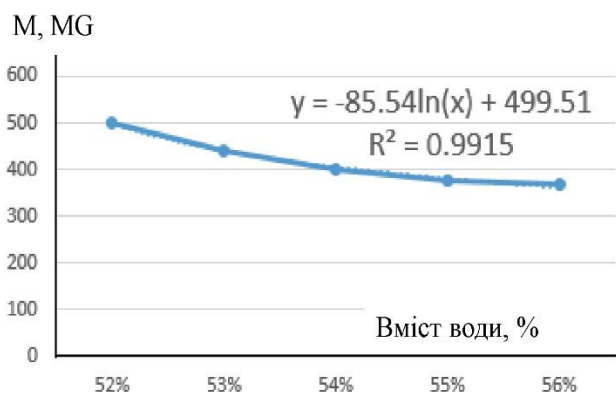
Рисунок 3.6 – Криві замішування з різними кількостями води, від 52 % до 56 %
(продовження)



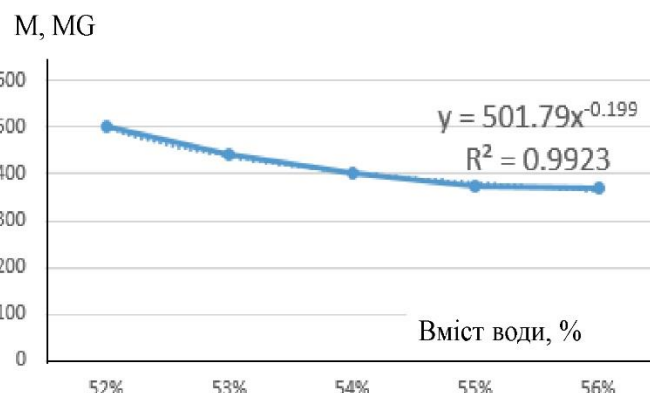
а



б



в



г

а – експоненціальне, б – лінійне, в – логарифмічне, г – степенева

Рисунок 3.7 – Аналітичні рівняння, які описують зміну консистенції для кожного відсотка доданої води

Таблиця 3.2 – Результати ANOVA з аналізом з одним фактором

Групи	Кількість	Сума	Середнє	Стандартне відхилення	Дисперсія	
280 Вт·год/кг	10	5375	538	5,37	28,72	
330 Вт·год/кг	10	5575	558	10,03	100,48	
380 Вт·год/кг	10	5721	573	10,02	100,21	
450 Вт·год/кг	10	5428	543	3,61	12,98	
Джерело варіації	SS	df	MS	F	P-значення	F крит.
Між групами	7245,08	3,00	241,9	39,94	$1,58 \cdot 10^{-11}$	2,86
В межах груп	2182,70	37,00	60,70	–	–	–
Усього	9426,78	38,00	–	–	–	–

Зібрані дані показують, що найкращий результат був отриманий при накопиченій специфічній енергії, введеної в тісто, 380 Вт·год/кг. Значення 280 і 330 Вт·год/кг були недостатніми для належного розвитку клейковини, що призвело до неналежного бродіння, тоді як специфічна енергія 450 Вт·год/кг була занадто великою; тісто реєструвало високий ступінь розм'якшення, що ускладнювало подальшу роботу з ним у наступних етапах процесу хлібопечення. Можна сказати, що 380 Вт·год/кг представляє критичний рівень енергії, після якого тісто переходить у прискорений процес розм'якшення.

Рис. 3.8 представляє графік об'єму хліба, отриманого при кожній енергії, введеної в тісто, а рис. 3.9 показує фотографії зі шматочками хліба, що відповідають кожному з чотирьох значень.

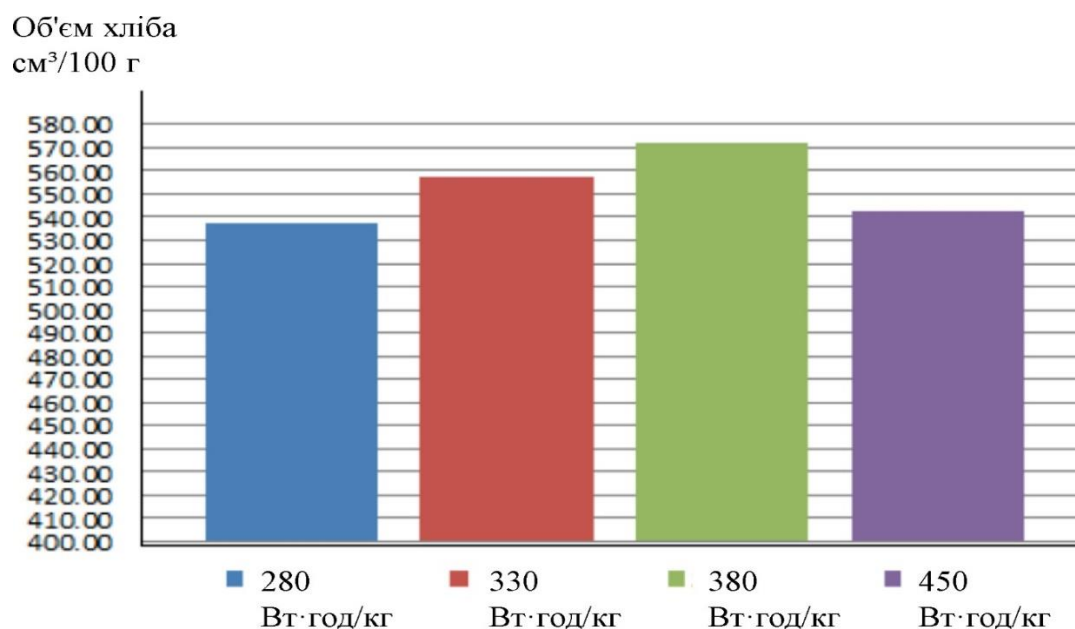


Рисунок 3.8 – Зміна об'єму хліба з накопиченою енергією, введеною в тісто

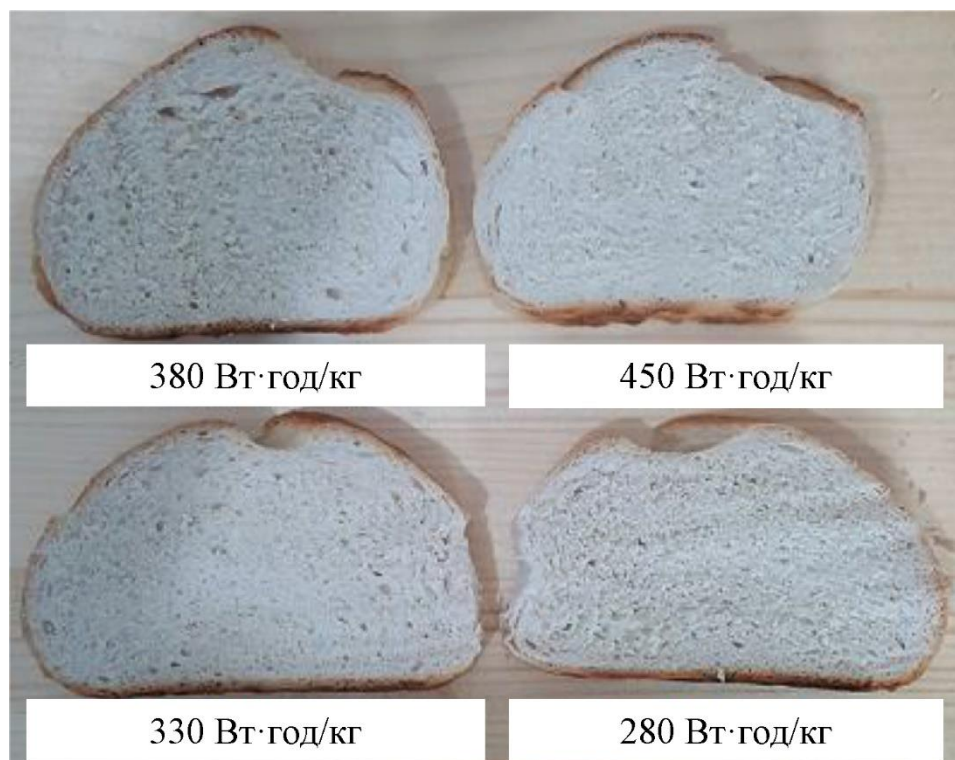


Рисунок 3.9 – Зразки шматочків хліба для різних енергій, введених у тісто

Висновки за розділом

Замішування тіста є складним явищем, яке можна контролювати, створюючи симбіоз між властивостями борошна, оптимальною кількістю енергії, введеної в тісто, та технологічними обмеженнями лінії, на якій обробляється хліб. Для борошна, а особливо для середньої та низької якості, накопичена специфічна енергія, введена в тісто, є суттєвим елементом для належного розвитку тіста через його низьку стабільність та вищий ступінь пом'якшення. Контроль процесу замішування за цим параметром порівняно з миттєвим енергетичним вхідним показником є більш надійним, оскільки потужне борошно має іншу поведінку, ніж середнє чи слабке борошно.

Для оптимального розвитку тіста важливо знати правильну кількість води, яку можна додати до оброблюваного борошна, та оптимальну кількість специфічної енергії, введеної в тісто під час процесу замішування, при якій тісто реєструє пік розвитку глютену. Накопичена специфічна енергія, введена в тісто, зменшується з кожним відсотком доданої води, але не лінійно, найкраща трендова

лінія, що описує цей процес, є степенева аналітична формула. Отримані результати з варіюванням кількості води в тісті (по відношенню до борошна) показали чітке зображення впливу на процес замішування. Значення консистенції, отримані на різних рівнях гідратації, можуть бути використані для створення шкали в процесі замішування для подальшої обробки борошна.

Видима зміна обсягу хліба для тіста, замішаного на різних рівнях накопиченої специфічної енергії, введеної в тісто, показує чітку необхідність контролю цього параметра, що може забезпечити можливість стабілізувати промисловий процес та отримувати продукцію вищої якості.

Для процесу виробництва хліба, де проводилися випробування, оптимальне поглинання води було встановлено на рівні 54 %, віднесеному до борошна. Тісто вважалося повністю розвиненим після замішування до встановленої точки накопиченої специфічної енергії 380 Вт·год/кг, протягом фіксованих 3 хв на першій швидкості (80 об./хв) та змінного часу замішування на другій швидкості 150 об./хв.

Встановивши систему контролю за тістом, можна контролювати кінцеву консистенцію тіста, зупиняючи процес замішування після досягнення накопиченої специфічної енергії (раніше визначеної як оптимальна) для цього окремого процесу виробництва хліба. Увесь процес виробництва хліба стає більш стабільним, що призводить до покращення якості кінцевої продукції та зменшення витрат на виробництво. Візуалізуючи кожну криву замішування, оператор може вибрати оптимальний режим замішування, щоб досягти найкращих результатів у розвитку тіста, замінюючи звичайний органолептичний аналіз, який проводиться в кінці замішування.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Охорона праці та захист навколишнього середовища є критично важливими аспектами управління виробництвом у хлібопекарнях. В умовах безперервної роботи, великої кількості технологічного обладнання та високих виробничих навантажень існує безліч небезпечних і шкідливих факторів, які можуть загрожувати здоров'ю та безпеці працівників. Під час приготування тіста та випічки хліба, де технологічний процес вимагає взаємодії з потужними механізмами, необхідно особливо уважно ставитися до дотримання вимог охорони праці.

У хлібопекарнях існує безліч небезпечних і шкідливих факторів, які можуть впливати на здоров'я працівників:

1. Механічні фактори:

– Пошкодження від обладнання: тістоміси, конвеєри та інші механізми можуть викликати травми через неправильне використання. Найбільш поширеними травмами є порізи, розтягнення, забої та защемлення.

– Недотримання правил експлуатації: ігнорування правил безпеки може призвести до серйозних травм, зокрема внаслідок заклинювання частин тіла в механізмах.

2. Фізичні фактори:

– Висока температура: процес випічки хліба супроводжується використанням печей, що досягають високих температур, що може призвести до опіків, якщо працівники не дотримуються запобіжних заходів.

– Шум: робота обладнання супроводжується підвищеним рівнем шуму, що може викликати порушення слуху у працівників, якщо не використовуються засоби захисту слуху.

3. Хімічні фактори:

– Алергічні реакції: компоненти тіста (борошно, дріжджі) можуть викликати алергічні реакції у деяких працівників.

– Використання мийних засобів: небезпечні хімічні речовини, які

застосовуються для очищення обладнання, можуть викликати отруєння чи шкірні захворювання.

4. Біологічні фактори:

– Контамінація продуктів: можливість забруднення хлібобулочних виробів мікроорганізмами, які можуть викликати харчові отруєння, якщо не дотримуються правил гігієни.

5. Психосоціальні фактори:

– Стрес і перевтома: інтенсивність праці в умовах великих замовлень може призводити до стресу, що негативно впливає на загальний стан працівників.

З метою захисту працівників від впливу небезпечних і шкідливих факторів на робочому місці необхідно вжити наступні заходи:

1. Організаційні заходи:

– Регулярні інструктажі з охорони праці: проведення планових навчань для всіх працівників щодо безпеки на робочому місці та основних небезпек, пов'язаних з їхньою роботою.

– Чіткі правила та процедури: встановлення правил експлуатації обладнання, які повинні бути доступні та зрозумілі всім працівникам.

2. Технічні заходи:

– Захисні екрани та огороження: використання огорожень і бар'єрів на небезпечних ділянках обладнання для запобігання травм.

– Вентиляційні системи: забезпечення належної вентиляції в робочих зонах для зниження концентрації небезпечних викидів, що можуть виникати під час роботи.

3. Індивідуальні засоби захисту:

– Спеціальний одяг: забезпечення працівників відповідними засобами індивідуального захисту, такими як фартухи, рукавички, захисні окуляри, щоб зменшити ризик травм та захворювань.

– Засоби захисту слуху: в умовах підвищеного шуму необхідно використовувати беруші або навушники, що знижують рівень шуму.

На рис. 4.1 наведено картку безпеки праці оператора тістоміса.

<p>1. Загальна інформація</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Місце роботи – лінія з виробництва хлібобулочних виробів. 2. Вид робіт – приготування тіста. 3. Посада – оператор лінії. 4. Тривалість робочого часу – 2 зміни (07:00–18:30; 19:00–06:30). 5. Проходження медогляду – 1 раз на рік. 6. Проходження вторинного інструктажу з охорони праці – 1 раз на 6 місяців. 7. Термін дії картки: до 01.12.2029 р. 	<p>2. Забезпечення одягом та засобами індивідуального захисту</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Головний убір – 1 раз на рік. 2. Взуття шкіряне жаростійке – 1 раз на 6 місяців. 3. Нарукавники бавовняні – 1 раз на 3 місяці. 4. Рукавиці трикотажні, навушники протишумові, окуляри захисні – до зносу. 								
<p>3. Вимоги перед початком роботи</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. До роботи допускають осіб, які досягли 18-річного віку, пройшли медичне обстеження та не мають медичних протипоказань, вступний інструктаж, спеціальне навчання. 2. Робітник повинен одягнути спецодяг, підготувати робочу зону. 3. Перевірити роботу штучної вентиляції, справність та наявність захисних огорожень приводів робочих органів. 4. Перед запуском тістоміса працівник повинен переконаватися у його справності, відсутності механічних пошкоджень, чистоті та готовності до роботи, наявності захисних огорожень, які запобігають доступу до рухомих частин. 5. Перевірити роботу тістомісу на холостому ходу. 6. Про виявлені порушення і недоліки доповісти безпосередньому керівнику і до їх усунення до роботи не приступати. 	<p>4. Вимоги під час роботи</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Робітнику дозволяється виконувати тільки ту роботу, за якою пройдено навчання, інструктаж з охорони праці, до якої допущений особою, відповідальною за безпечне проведення робіт. 2. Необхідно утримувати своє робоче місце у належній чистоті, своєчасно прибирати з підлоги розсипані сипкі продукти, розлиті рідини тощо. 3. Необхідно уникати контакту з рухомими частинами. 4. Можна використовувати тільки справне устаткування, пристосування, інструмент. 5. Не дозволяється відкривати огороження під час роботи тістомісу. 6. Не дозволяється доручати свою роботу іншим особам, які не пройшли відповідний інструктаж та навчання. 								
<p>5. Вимоги після закінчення роботи</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Привести в порядок робоче місце, інструменти та пристосування прибрати у відведене місце. 2. Перед очищенням або ремонтом тістомісу обов'язково вимкнути його з електромережі. 3. Зняти і здати на збереження спецодяг і засоби індивідуального захисту. 4. Виконати правила особистої гігієни. 5. Про виявлені порушення і недоліки під час проведення робіт доповісти безпосередньому керівнику і змінному працівнику. 	<p>6. Вимоги в надзвичайних ситуаціях</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. негайно припинити всі роботи. 2. вимкнути все обладнання; 3. доповісти керівнику про виникнення надзвичайної ситуації. 								
<p>Контакти служб екстреної допомоги</p>									
<p>Внутрішні службові номери: Майстер відділення: 000-00-00 Служба охорони праці: 000-00-00 – головний інженер, 000-00-00 – медичний кабінет.</p>	<div style="text-align: center;"> <p>Номери телефонів екстрених служб</p> <p>Номер телефону для всіх видів екстреної допомоги 112</p> <table border="0"> <tr> <td style="text-align: center;"> <p>Служба пожежної безпеки</p> <p>101</p> </td> <td style="text-align: center;">  </td> <td style="text-align: center;"> <p>Швидка медична допомога</p> <p>103</p> </td> <td style="text-align: center;">  </td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"> <p>Поліція</p> <p>102</p> </td> <td style="text-align: center;">  </td> <td style="text-align: center;"> <p>Аварійна газова служба</p> <p>104</p> </td> <td style="text-align: center;">  </td> </tr> </table> </div>	<p>Служба пожежної безпеки</p> <p>101</p>		<p>Швидка медична допомога</p> <p>103</p>		<p>Поліція</p> <p>102</p>		<p>Аварійна газова служба</p> <p>104</p>	
<p>Служба пожежної безпеки</p> <p>101</p>		<p>Швидка медична допомога</p> <p>103</p>							
<p>Поліція</p> <p>102</p>		<p>Аварійна газова служба</p> <p>104</p>							

Рисунок 4.1 – Картка безпеки праці оператора тістоміса

Хлібопекарське виробництво є важливим елементом харчової промисловості, але його діяльність супроводжується утворенням різноманітних відходів. Ефективне управління відходами в цьому секторі сприяє не лише збереженню навколишнього середовища, а й оптимізації виробничих процесів. Основні види відходів у хлібопекарському виробництві включають органічні відходи (залишки тіста, хліба та інших виробів, які не відповідають стандартам якості; харчові відходи з технологічного процесу, такі як борошняний пил і обрізки тіста), тверді побутові відходи (упаковка від сировини, паперові мішки, пластикові контейнери), рідкі відходи (залишки технологічних розчинів, стічні води з миття обладнання та приміщень), а також викиди в атмосферу (частки борошна, пилу та газів, що утворюються під час випікання).

Для екологічного поводження з відходами необхідно вживати відповідних заходів. Це включає сортування та переробку, зокрема впровадження системи роздільного збору твердих відходів, передачу органічних відходів для переробки у корм тваринам або для виробництва біогазу, а також оптимізацію технологічних процесів, наприклад, удосконалення системи дозування сировини для мінімізації втрат і регулярне технічне обслуговування обладнання. Для очищення стічних вод можна використовувати локальні очисні споруди або впроваджувати замкнені цикли водокористування. Управління викидами передбачає встановлення фільтрів і вентиляційних систем для зменшення викидів борошняного пилу та використання енергоефективного обладнання для зниження газових викидів.

Екологічне управління відходами забезпечує низку переваг, зокрема зменшення негативного впливу на довкілля, підвищення економічної ефективності виробництва, а також покращення репутації підприємства серед споживачів. Таким чином, поводження з відходами у хлібопекарському виробництві потребує системного підходу, який поєднує сучасні технології та екологічно відповідальну поведінку. Виконання цих заходів сприятиме збереженню природних ресурсів, покращенню екологічної ситуації та забезпеченню сталого розвитку галузі.

Висновки за розділом

Забезпечення охорони праці та захисту навколишнього середовища у хлібопекарні є необхідною умовою для безпечного і ефективного функціонування виробництва. Знання небезпечних і шкідливих факторів, а також дотримання правил безпеки під час роботи з обладнанням сприяють зниженню ризиків травмування працівників та підвищують загальний рівень безпеки на підприємстві. Реалізація ефективних заходів щодо охорони праці може суттєво покращити умови праці та знизити ймовірність виникнення надзвичайних ситуацій.

Організація безпечного виробництва є запорукою не тільки здоров'я працівників, але й успішності самого підприємства, оскільки безпека на робочому місці безпосередньо впливає на продуктивність, мотивацію працівників та імідж компанії.

5 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Технологічний процес замішування тіста при виробництві хлібобулочних виробів, який розглядався в даній роботі, відрізнявся від базового змішувачем тіста. Тому подальша економічна оцінка проведена шляхом порівняння двох тістомісів: із спіральними і прямими замішувальними робочими органами.

За базовий варіант прийнято тістоміс DIOSNA SPV 120 із прямими замішувальними робочими органами. В якості проектного обрані спіральні замішувальні робочі органи Згідно проведених досліджень (розділи 2-3): продуктивність складала для базового варіанту 120 кг/год, а для проектного 92 кг/год. При цьому споживана потужність для базового варіанту складає 5,91 кВт, а для проектного – 2,31 кВт. Вартість базового варіанту складає 160000 грн. Приймаємо, що проектний варіант дорожче за базовий на 10000 грн, тобто на вартість спіральних змішувальних робочих органів.

Вихідними даними для розрахунку є добове виробництва тіста – 400 кг. Кількість робочих днів за рік – 262. Вартість електроенергії – 7,2 грн/кВт·год. Коефіцієнт відрахування на ремонт і технічне обслуговування обладнання – 0,10. Коефіцієнт відрахування на амортизацію обладнання – 0,10.

Час роботи тістоміса на добу (Т) розраховується як:

$$T = D/P \quad (5.1)$$

де D – добове виробництво, кг; P – продуктивність тістоміса кг/год.

Для базового тістоміса: $T_1 = 400/120 = 3,33$ год.

Для проектного тістоміса: $T_2 = 400/92 = 4,35$ год.

Річне споживання електроенергії для кожного тістоміса (А) розраховується за формулою:

$$A = T \times W \times N \quad (5.2)$$

де T – час роботи на добу, год; W – споживана потужність, кВт; N – кількість робочих днів.

Для базового тістоміса: $A_1 = 3,33 \text{ год} \times 5,91 \text{ кВт} \times 262 = 5134,6 \text{ кВт}\cdot\text{год}$.

Для проектного тістоміса: $A_2 = 4,35 \text{ год} \times 2,31 \text{ кВт} \times 262 = 3405,8 \text{ кВт}\cdot\text{год}$.

Річні витрати на електроенергію (C_e) розраховуються як:

$$C_e = A \times E \quad (5.3)$$

де A – річне споживання електроенергії, кВт·год; E – вартість електроенергії, грн/кВт·год.

Для базового тістоміса $C_{e1} = 5134,6 \times 7,2 = 36969,12$ грн.

Для проектного тістоміса: $C_{e2} = 3405,8 \times 7,2 = 24493,18$ грн.

Річні витрати на амортизацію (C_a) розраховуються як:

$$C_a = C \times K_2 \quad (5.4)$$

де C – вартість тістоміса, грн; K_2 – коефіцієнт амортизації.

Для базового тістоміса: $C_{a1} = 160000 \times 0,10 = 16000$ грн.

Для проектного тістоміса: $C_{a2} = 170000 \times 0,10 = 17000$ грн.

Річні витрати на ремонт і технічне обслуговування (C_r) розраховуються як:

$$C_r = C \times K_1 \quad (5.5)$$

де C – вартість тістоміса, грн; K_1 – коефіцієнт відрахування на ремонт.

Для базового тістоміса: $C_{r1} = 160000 \times 0,10 = 16000$ грн.

Для проектного тістоміса: $C_{r2} = 170000 \times 0,10 = 17000$ грн.

Загальні річні витрати (C_t) розраховуються як:

$$C_t = C_e + C_a + C_r \quad (5.6)$$

де C_e – витрати на електроенергію, грн; C_a – витрати на амортизацію, грн; C_r – витрати на ремонт, грн.

Для базового тістоміса: $C_{t1} = 36969,12 + 16000 + 16000 = 68969,12$ грн.

Для проектного тістоміса: $C_{t2} = 24493,18 + 17000 + 17000 = 58493,18$ грн.

Економічний ефект (E_e) – це різниця в загальних витратах:

$$E_e = C_{t1} - C_{t2} \quad (5.7)$$

$E_e = 68969,12 - 58493,18 = 10475,94$ грн.

Строк окупності (T_o) розраховується як:

$$T_o = (C_2 - C_1) / E_e \quad (5.8)$$

де $(C_2 - C_1)$ – різниця у вартості тістомісів, грн; E_e – економічний ефект, грн.

$T_o = 10000 / 10475,94 = 0,95$ років

Висновки за розділом

Технологічний процес замішування тіста, що розглядався в даній роботі, відрізняється від базового варіанту завдяки використанню тістоміса з спіральними замішувальними робочими органами. Результати розрахунків вказують на те, що, незважаючи на нижчу продуктивність проектного тістоміса (92 кг/год проти 120 кг/год у базового), його споживана потужність значно менша (2,31 кВт проти 5,91 кВт у базового варіанту). Економічний ефект від використання проектного тістоміса становить 10 475,94 грн, а строк його окупності – 0,95 років. Таким чином, обраний проектний варіант, попри початкові витрати на модернізацію, є вигідним з економічної точки зору завдяки значним заощадженням на електроенергії та меншому рівню експлуатаційних витрат.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

1. Приготування пшеничного тіста є критично важливим етапом у виробництві хлібобулочних виробів, оскільки його якість безпосередньо впливає на кінцевий продукт. Вибір способу приготування та ефективність тістомісів, а також контроль параметрів замішування, таких як час і температура, є необхідними для досягнення високої якості хліба. Різноманітність технологічних процесів, включаючи опарний і безопарний методи, дозволяє адаптувати виробництво до специфічних умов підприємства, підвищуючи ефективність і органолептичні властивості готової продукції. Це свідчить про важливість комплексного підходу до вибору обладнання та технологій у сучасній хлібопекарській промисловості.

2. Геометрія лопатей замішувача, зокрема спіральна, має суттєвий вплив на розвиток тіста та його реологічну поведінку під час замішування, що підтверджується як експериментальними вимірюваннями, так і 3D-симуляціями. Результати досліджень свідчать про те, що точний контроль часу замішування і розуміння впливу геометрії робочого органу на реологічні властивості тіста є критично важливими для оптимізації процесу виробництва хлібобулочних виробів. Це знання може бути використано для редизайну обладнання, що відповідає сучасним вимогам ринку і підвищує ефективність виробництва.

3. Процес замішування тіста є складним явищем, що потребує точного контролю накопиченої специфічної енергії та вмісту води для забезпечення оптимального розвитку глютену і досягнення стабільної якості хлібобулочних виробів. Встановлення системи контролю за параметрами замішування дозволяє покращити кінцеву консистенцію тіста, зменшити виробничі витрати та забезпечити стабільність процесу, що, в свою чергу, сприяє отриманню продукції вищої якості. Використання аналітичних моделей для опису впливу вмісту води на процес замішування може замінити традиційні методи оцінки, роблячи виробництво більш ефективним.

4. Охорона праці та захист навколишнього середовища є критично важливими для хлібопекарень. В умовах інтенсивної роботи з обладнанням,

важливо дотримуватись заходів безпеки, щоб знизити ризики травм і забезпечити здоров'я працівників. Знання про небезпечні фактори, регулярні інструктажі, перевірка обладнання та використання засобів індивідуального захисту сприяють покращенню умов праці. Хлібопекарське виробництво є важливою частиною харчової промисловості, але супроводжується утворенням різноманітних відходів. Для екологічного поводження з відходами необхідно впроваджувати сортування, переробку, удосконалення технологічних процесів та очищення стічних вод.

5. Технологічний процес замішування тіста, що розглядався в даній роботі, відрізняється від базового варіанту завдяки використанню тістоміса з спіральними замішувальними робочими органами. Результати розрахунків вказують на те, що, незважаючи на нижчу продуктивність проектного тістоміса (92 кг/год проти 120 кг/год у базового), його споживана потужність значно менша (2,31 кВт проти 5,91 кВт у базового варіанту). Економічний ефект від використання проектного тістоміса становить 10 475,94 грн, а строк його окупності – 0,95 років. Таким чином, обраний проектний варіант, попри початкові витрати на модернізацію, є вигідним з економічної точки зору завдяки значним заощадженням на електроенергії та меншому рівню експлуатаційних витрат.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Алієв Е.Б., Миколенко С.Ю., Сова Н.А., та ін. Техніко-технологічне забезпечення безвідходної переробки зернової сировини у харчові продукти і корми: колективна монографія (Е. Б. Алієв, ред.). Дніпро: ЛПА. 2022. 192 с. ISBN 978-966-981-687-0.
2. Mykolenko S., Aliieva O., Aliiev E., Pivovarov O. Technological and nutritional benefits of amaranth groats in breadmaking. *Scientific Horizons*, 2022, 25(11), 63–73. [https://doi.org/10.48077/scihor.25\(11\).2022.63-73](https://doi.org/10.48077/scihor.25(11).2022.63-73).
3. Mykolenko S.Yr., Aliiev E.B., Dudin V.Yr. Composite wheat-amaranth flour baking properties and bread freshness. In IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. International Scientific and Theoretical Conference "Modeling and Computer Engineering in Mechanical Engineering: Theory, Practice, and Innovation" (МСЕМЕ-2022) (Vol. 1277, p. 012021). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1277/1/012021>.
4. Алієв Е.Б., Миколенко С.Ю., Дудін В.Ю. Патент України на корисну модель 151728, МПК (2006) G01N 3/44 (2006.01), G01N 19/00, G01B 3/00. Пристрій для автоматичного визначення структурно-механічних властивостей харчових мас. Заявник: Дніпровський державний аграрно-економічний університет, № u202106596. Заявл. 08.09.2022. Опубл. 07.09.2022, бюл. № 36.
5. Миколенко С.Ю., Алієв Е.Б., Алієва О.Ю., Долгіх Д.О. Структурно-механічні характеристики хлібних виробів із різним вмістом борошна амаранту. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*, 2022, 32, 132–142. <https://doi.org/10.36710/ІОС-2022-32-13>.
6. Leonte M. Study of factors which influence the rheological properties of bread dough. In *Current issues in milling and bread making industry*. Bucharest: Bucharest Pub. House. 2011, Vol. 1, p. 5.
7. Burluc R. M. Technology and quality control in bread making industry [Course notes]. Galati, Romania. 2007.
8. Haraszi R., Larroque O.R., Butow B.J., Gale K.R., Bekes F. Differential mixing action effects on functional properties and polymeric protein size distribution of wheat dough.

Journal of Cereal Science, 2008, 47(1), 41. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2007.01.007>.

9. Amjid M.R., Shehzad A., Hussain S., Shabbir M.A., Khan M.R., Shoaib M. A comprehensive review on wheat flour dough rheology. *Pakistan Journal of Food Science*, 2013, 23(2), 105–123.

10. Apostol L., Belc N., Gaceu L., Vladut V., Oprea O.B. Chemical composition and rheological parameters of *Helianthus tuberosus* flour used as a source of bioactive compounds in bakery. *Revista de Chimie*, 2019, 70(6), 2048–2053. <https://doi.org/10.37358/RC.19.6.7273>.

11. Oprea O.B., Apostol L., Bungau S., Cioca G., Samuel A.D., Badea M., Gaceu L. Researches on the chemical composition and the rheological properties of wheat and grape epicarp flour mixes. *Revista de Chimie*, 2018, 69(1), 70–75.

12. Travnicek P., Burg P., Krakowiak-Bal A., Junga P., Vitez T., Ziemianczyk U. Study of rheological behaviour of wines. *International Agrophysics*, 2016, 30(4), 509–518.

13. Sharoba A.M., El-Desouky A.I., Mahmoud M.H. Improving sensory and rheological properties of artificially sweetened papaya-apricot nectar with some hydrocolloids. *Journal of Biological Chemistry and Environmental Sciences*, 2009, 4(2), 363–381.

14. Smadi S., Popovici I., Cojocaru I., Braha S., Ochiuz L., Dorneanu O. Physico-chemical characterization, rheological behaviour and evaluation of antifungal activity of propiconazole nitrate gels. *Materiale Plastice*, 2009, 46(1), 83–90.

15. Mancini M., Moresi M. Rheological behaviour of baker's yeast suspensions. *Journal of Food Engineering*, 2000, 44(3), 225–231.

16. Nemtanu M.R., Brasoveanu M., Martin D., Manaila E., Iovu H., Dinescu A. Physicochemical and structural characterization of corn starch modified by combined electron beam with microwave treatment. *Materiale Plastice*, 2009, 46(4), 413–418.

17. Abdelrahman R., Ahmed M.I., Mohammed I., Senge B. Oscillation measurements and creep test of bread prepared from wheat-lupin flours and wheat-lupin fibre dough blends. *Annual Transactions of the Nordic Rheology Society*, 2012, 20, 145.

18. Rouille J., Della Valle G., Lefebvre J., Sliwinski E., Van Vliet T. Shear and extensional properties of bread doughs affected by their minor components. *Journal of Cereal Science*, 2005, 42(1), 45. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2004.12.008>.

19. Trevor S.K., McKinley G.H., Padmanabhan M. Linear to non-linear rheology of

wheat flour dough. *Applied Rheology*, 2006, 16(5), 1. <https://doi.org/10.1515/arh-2006-0019>.

20. Gharahi H., Zambrano B.A., Zhu D.C., DeMarco J.K., Baek S. Computational fluid dynamic simulation of human carotid artery bifurcation based on anatomy and volumetric blood flow rate measured with magnetic resonance imaging. *International Journal of Advanced Engineering Sciences and Applied Mathematics*, 2016, 8(1), 40–60. <https://doi.org/10.1007/s12572-016-0161-6>.

21. Bredberg J. On two-equation eddy-viscosity models. Department of Thermo and Fluid Dynamics, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden. 2001.

22. Luchian M.I. Contribution on the energetic optimization of bread dough mixing process [PhD thesis]. Transilvania University of Brasov, Romania. 2012.

23. Venkat R., Vinayaka R., Krishnaiah S. Indigenous development and testing of rotational viscometer for bituminous binders. *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 2014, 4(3), 286. <https://doi.org/10.6088/ijcser.201304010028>.

24. Ritwik. Measuring the viscous flow behavior of molten metals under shear [PhD thesis]. Brunel University, United Kingdom. 2012.

25. Muscalu G., Voicu G., Istudor A. Bread dough kneading process optimization in industrial environment, using a device for dough consistency control. *University of Polytechnic of Bucharest Scientific Bulletin, Series D*, 2017, 79(3), 225.

26. Gras P.W., Carpenter H.C., Andersen R.S. Modelling the developmental rheology of wheat flour dough using extension tests. *Journal of Cereal Science*, 2000, 31(1), 1–13.

27. Wilson A.J., Morgenstern M.P., Kavale S. Mixing response of a variable speed 125 g laboratory scale mechanical dough development mixer. *Journal of Cereal Science*, 2001, 34(2), 151–158.

28. Zheng H., Morgenstern M.P., Campanella O.H., Larsen N.G. Rheological properties of dough during mechanical dough development. *Journal of Cereal Science*, 2000, 32(3), 293–306.

29. Hwang C.H., Gunasekaran S. Determining wheat dough mixing characteristics from power consumption profile of a conventional mixer. *Cereal Chemistry*, 2001, 78(1), 88–92.

30. Voicu Gh., Căsăndroiu T., Mieilă Cr. Aspecte teoretice și practice cu privire la caracterizarea reologică a aluatului din făină de grâu în timpul frământării. (Theoretical and experimental aspects regarding the rheological characterization of wheat flour dough behavior at kneading). *Modelling and Optimization in the Machines Building Field*, Romanian Technical Sciences Academy, 2005, 2(11), 283–288.
31. Contamine A.S., Abecassis J., Morel M.H., Vergnes B., Verel A. Effect of mixing conditions on quality of doughs and biscuits. *Cereal Chemistry*, 1995, 72.
32. Amemiya J.I., Menjivar J.A. Comparison of small and large deformation measurements to characterize the rheology of wheat flour doughs. *Journal of Food Engineering*, 1992, 16, 91–108.
33. Haraszi R., Larroque O.R., Butow B.J., Gale K.R., Bekes F. Differential mixing action effect on functional properties and polymeric protein size distribution of wheat dough. *Journal of Cereal Science*, 2008, 47, 41–45.
34. Mani K., Eliasson A.C., Lindhal L., Trägårdh C. Rheological properties and bread making quality of wheat flour doughs made with different dough mixers. *Cereal Chemistry*, 1992, 69, 222–225.
35. Voicu G. H. Processes and equipments for bakery. Bren Publishing House. 1999.
36. Wilson A.J., Wooding A.P., Morgenstern M.P. Comparison of work input requirement on laboratory-scale and industrial-scale mechanical dough development mixers. *Cereal Chemistry*, 1997, 74, 715–721.
37. Wooding A.R., Kavale S., MacRitchie F., Stoddard F.L. Link between mixing requirements and dough strength. *Cereal Chemistry*, 1999, 76, 800–806.
38. Aït Kaddour A., Mondet M., Cuq B. Application of two-dimensional cross-correlation spectroscopy to analyse infrared (MIR and NIR) spectra recorded during bread dough mixing. *Journal of Cereal Science*, 2008, 48(3), 678–685. <https://doi.org/10.1016/J.JCS.2008.03.001>.
39. Alberini F., Bezchi D., Mannino I.C., Paglianti A., Montante G. Towards real time monitoring of reacting species and pH coupling electrical resistance tomography and machine learning methodologies. *Chemical Engineering Research and Design*, 2021, 168, 369–382. <https://doi.org/10.1016/J.CHERD.2021.02.024>.

40. Dufour M., Foucat L., Hugon F., Dugué A., Chiron H., Della Valle G., Kansou K., Saulnier L. Water mobility and microstructure of gluten network during dough mixing using TD NMR. *Food Chemistry*, 2023, 409, 135329. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2022.135329>.
41. Fanari F., Keller J., Desogus F., Grosso M., Wilhelm M. Impact of water and flour components in dough investigated through low-field nuclear magnetic resonance. *Chemical Engineering Transactions*, 2021, 87, 289–294. <https://doi.org/10.3303/CET2187049>.
42. Gómez M., Talegón M., de la Hera E. Influence of mixing on quality of gluten-free bread. *Journal of Food Quality*, 2013, 36(2), 139–145.
43. Maluta F., Montante G., Paglianti A. Analysis of immiscible liquid-liquid mixing in stirred tanks by Electrical Resistance Tomography. *Chemical Engineering Science*, 2020, 227, 115898. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115898>.
44. Paglianti A., Marotta G., Montante G. Applicability of electrical resistance tomography to the analysis of fluid distribution in haemodialysis modules. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2020, 98(9), 1962–1972.
45. Patel D., Ein-Mozaffari F., Mehrvar M. Using tomography technique to characterize the continuous flow mixing of non-newtonian fluids in stirred vessels. *Chemical Engineering Transactions*, 2013, 32, 1465–1470. <https://doi.org/10.33032/CET1332245>.
46. Sinelli N., Casiraghi E., Downey G. Studies on proofing of yeasted bread dough using near- and mid-infrared spectroscopy. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56(3), 922–931. <https://doi.org/10.1021/JF0727138>.
47. Ulrici A., Vigni M.L., Durante C., Foca G., Belloni P., Brettagna B., de Marco T., Cocchi M. At line monitoring of the leavening process in industrial bread making by near infrared spectroscopy. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 2008, 16(3), 223–231. <https://doi.org/10.1255/JNIRS.781>.
48. Yazar G., Demirkesen I. Linear and non-linear rheological properties of gluten-free dough systems probed by fundamental methods. *Food Engineering Reviews*, 2022, 15(1), 56–85. <https://doi.org/10.1007/S12393-022-09321-3>.