

**Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя**

І.Я. Стадник

Науково - технічні основи дискретної дії на компоненти при перемішуванні



**м. Тернопіль
2015**

УДК 664.6
ББК 65.9(2)304.25
С76

*Рекомендовано до друку вченою радою Тернопільського національного
технічного університету імені Івана Пулюя
протокол № 3 від 24 березня 2015 р.*

Рецензенти:

*Шевченко О.Ю., докт. техн. наук, професор;
Гава О.М., докт. техн. наук, професор;
Добротвор І.Г., докт. техн. наук, професор;
Василів В.П., канд. техн. наук, доцент.*

С76 Стадник І.Я. Науково-технічні основи дискретної дія на компоненти при перемішуванні : Монографія / Стадник І.Я. – Тернопіль : Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2015. – 240 с.

ISBN 978-966-305-074-4

В монографії розглянуто основи теорії тісто утворення, розпочаті професором О.Т. Лісовенком, які спрямовані на інтенсифікацію процесу взаємодії компонентів. Викладено сучасні уявлення про безлопатеве дискретне замішування тіста. Проаналізовано основні конструктивні, технологічні та фізико-хімічні аспекти і принципи інтенсивного замішування. Розглянуто вплив конструкції місильного органу, робочої камери на динамічні характеристики регулювання процесів приготування тіста.

Запропоновано розроблення нового покоління тістомісильних машин, функціональні можливості яких дозволяють суттєво розширити область їх застосування і створити нові методи регулювання їхньої структури та властивостей. Показано, що створення дискретних тістомісильних машин забезпечує високий ступінь конструктивно-технологічного забезпечення процесів в умовах впливу різних зовнішніх факторів. Обґрунтовано енергетичні аспекти, які впливають на зниження енергоємності за допомогою величини деформації зрушення і питомої роботи. Наведено основні технічні характеристики, конструктивні особливості й режими роботи дискретної безлопатевої тістомісильної машини. Подано практичні рекомендації стосовно шляхів розрахунку нових місильних органів, багатограних робочих камер. Запропоновано методи та обґрунтування отриманих результатів з результатами експериментальних досліджень. Розроблено принцип проектування й моделювання інженерного розрахунку даного класу машин для перемішування. Призначено для науковців, інженерно-технічних працівників, які займаються створенням, модернізацією й експлуатацією тістомісильних машин у хлібопекарській, кондитерській та інших галузях промисловості. Може бути корисною для аспірантів, магістрів та студентів відповідних спеціальностей.

УДК 664.6
ББК 665.9(2)304.25

© Стадник І.Я. 2015
© Тернопільський національний технічний
університет імені Івана Пулюя, 2015

ISBN 978-966-305-074-4

Зміст	стор.
Передмова.....	5
Вступ.....	7
РОЗДІЛ 1. Використання методів інтенсифікації для побудови безлопатевого машин замішування тіста.....	9
1.1. Структура тістомісильних машин та удосконалення конструктивних елементів.....	9
1.2. Вплив основних методів інтенсифікації на процес замішування...	16
1.3 Розвиток конструктивних схем для безлопатевого замішування.....	23
1.3.1. Принцип побудови тістомісильних машин з безлопатевою робочим органом.....	25
1.3.2. Конструктивні особливості безлопатевого замішування.....	30
1.3.3. Аналіз параметрів основних елементів безлопатевого тістомісильних машини.....	33
1.3.4. Теоретичні основ стабільності процесу відносно вимог дискретного безлопатевого замішування.....	40
1.4. Класифікація тістомісильних машин з безлопатевою робочим органом.....	43
1.5. Обґрунтування надійності і довговічності.....	44
РОЗДІЛ 2. Характеристика об'єктів дослідження та методики виконання експериментів.....	51
2.1. Формування передумов дослідження безлопатевого замішування тіста.....	52
2.2. Характеристика об'єкту і завдання дослідження.....	54
2.3. Фізичне моделювання процесу безлопатевого замішування тіста...	56
2.3.1. Експериментальна модель безлопатевої тістомісильної машини..	59
2.3.1.1. Експериментальна установка для досліджень стабільності тістоутворення.....	62
2.3.1.2. Конструктивні особливості пластифікатора (ПВП) машини.....	65
2.3.2. Пілотна модель вібродозатора борошна.....	66
2.3.3. Пілотна модель дозатора рідких компонентів.....	68
2.4. Методика виконання досліджень.....	71
2.5. Методика виконання дослідження.....	73
2.5.1. Методика визначення показників.....	73
2.5.2. Методи визначення якості сировини і напівфабрикатів.....	75
2.6. Методи дослідження якості хліба.....	78
2.7. Спеціальні методи дослідження.....	79
2.8. Оцінка похибок вимірювання.....	85
РОЗДІЛ 3. Моделювання деформування тіста в умовах силового навантаження під час замішування.....	87

3.1. Об'єкти фізичних досліджень і математичного моделювання процесу замішування.....	87
3.2. Фактори впливу на структуру тіста.....	90
3.3. Математичне моделювання процесу замішування тіста у дискретній безлопатевій тістомісильній машині.....	93
3.3.1. Розробка аналітичної моделі процесу замішування на ДБТМ.....	99
3.3.2. Рівняння руху тіста під час замішування.....	105
3.3.3. Визначення напруження тертя на поверхні місильного барабана..	109
3.4. Визначення параметрів напружено-деформованого стану тіста методом математичного і комп'ютерного моделювання.....	110
3.4.1. Визначення гідродинамічних режимів руху змішуваних компонентів.....	120
3.5. Теоретична модель обчислення затрат потужності під час замішування тіста.....	122
РОЗДІЛ 4. Дослідження динаміки пластифікації тіста з оптимізацією параметрів.....	128
4.1. Характерні особливості пластикації на тістомісильній машині дискретної дії.....	128
4.1.1. Процес утворення тіста.....	130
4.1.2. Вплив адгезійної стійкості на процес пластифікації тіста.....	134
4.2. Дослідження фізико-механічних властивостей тіста в умовах розтягування.....	139
4.3. Визначення релаксацій напруження тіста при замішуванні.....	145
4.3.1. Узагальнення релаксацій напружень для тістоутворення.....	149
4.4. Дослідження кінетики деформації тіста на стадії пластикації.....	152
4.5. Дослідження стискання тіста.....	159
4.5.1. Вплив ступені стискання тіста при замішуванні на його якість...	161
РОЗДІЛ 5. Дослідження впливу конструктивних параметрів на тістоутворення.....	167
5.1. Дослідження руху частинки матеріалу в процесі замішування.....	167
5.2. Дослідження ефективної площі поверхні зерен крохмала з використанням наближених числових методів.....	173
5.3. Використання спектрального аналізу ділянок полімерного борошна при дослідженні параметрів поверхневих шарів тіста.....	180
5.4. Визначення динамічного процесу першої стадії тісто утворення тетодолм термодинамічних потенціалів.....	189
5.5. Визначення однорідності суміші компонентів при безлопатевому замішуванні.....	199
Основні висновки.....	205
Список використаної літератури.....	208
Додатки.....	227

Передмова

Дослідження в області утворення тіста, проведені під час виходу першого видання, дозволило отримати нові дані, що мають суттєве значення для теорії й практики замішування тіста. Виявлено закономірності, що характеризують зміни властивостей тістоутворення при використанні нових конструктивних і технологічних параметрів. Значно розширилися відомості про мало вивчені деформаційні впливи на якість тіста при його замішуванні. Розроблені й знаходяться в стадії впровадження нові методи і прилади для автоматичного контролю параметрів замішаного тіста.

Узагальнення всіх даних з метою отримання нового напрямку дискретного безлопатевого замішування тіста, що забезпечує отримання високоякісного тіста й хліба, стало завданням другого видання монографії.

Враховуючи зростаючі вимоги до хлібобулочних виробів при використанні вітчизняної сировини, необхідно було обґрунтовано проаналізувати сучасне представлення та запропонувати нове бачення теорії замішування тіста.

Необхідно зауважити, що не всі важливі вимоги до теорії і практики замішування тіста отримали обґрунтовані пояснення. Цілий ряд моментів проходження стадійності тістоутворення в робочій камері безлопатевої дискретної тістомісильної машини вимагає дослідження та вивчення. В даному випадку автор на основі проведених теоретичних та натурних досліджень розкриває новий напрямок не в повному обсязі. Ряд проблем потрібно у подальшому дослідити.

В деяких випадках є необхідність змінити напрям роботи з удосконалення робочих параметрів процесу, так як їх проведення буде сприяти подальшому технічному прогресу створення такого класу машин.

Намічено також ряд інших завдань, напрямків дослідження, вирішення яких дозволить у майбутньому повністю контролювати процес якісного замішування тіста й отримання якісних хлібобулочних виробів.

Більшість процесів у харчовій та переробній промисловості пов'язана з переробкою дисперсних систем, суспензій, колоїдних розчинів, різних в'язко-пластичних матеріалів. Переробна сировина на даних підприємствах та готова продукція має дуже різноманітні фізико – механічні та реологічні властивості. Процеси з переробки харчових продуктів відрізняються від процесів в інших виробництвах своєю складністю та своєрідністю.

За останні роки харчова промисловість почала розвиватися прискореними темпами на базі удосконалення технології та оснащення підприємств сучасним високопродуктивним обладнанням, що частково завозиться із – за кордону.

У наш час наука є рушійною силою будь-якої сфери людської діяльності, і, в першу чергу, це стосується виробництва. Розроблення нових напрямків при проектуванні процесів харчових та переробних виробництв і обладнання для їх проведення зумовлюється розвитком теорії та практики таких напрямків, як моделювання, оптимізація, технічна кібернетика та промислова кінетика. Ці методи постійно піддаються експериментальній перевірці, протягом десятиліть демонстрували свою надійність та ефективність.

Сучасні комп'ютерні інструментальні середовища дозволяють також здійснювати складні розрахунки й доводити їх до числових, або графічних наочних результатів у багатьох завданнях, які раніше вважалися надто складними для отримання остаточних результатів.

Вступ

Однак експлуатація технологічного устаткування в жорстких умовах, зокрема робота механізмів під впливом агресивних середовищ, при знакозмінних навантаженнях і високих температурах зумовлює підвищення вимог до їх експлуатаційних характеристик. При вдосконаленні конструкцій машин потрібно ретельно дослідити особливості процесів і забезпечити дотримання оптимальних параметрів у робочих камерах, а також враховувати конструкції робочих органів, вплив яких має відповідати основним вимогам теорії замішування, але не обмежувати творчої ініціативи винахідників.

Найекономнішим є використання машин серійних випусків. Пошук і перевірка інших варіантів конструктивного оформлення доцільні, коли серійні машини не можна використовувати через невідповідність матеріального виконання, робочих меж температури і тиску або через не достатньо високу інтенсивність замішування. У цих випадках конструювання машини не є єдиним виходом, часто раціональними виявляються зміни до технологічного процесу, зміни об'єму камери, місильного органу та ін.

Розрахунок машини дозволяє обгрунтовано виконати обчислення з визначення найекономніших варіантів (ціна машини, що випускають серійно, вартість її експлуатації, маси і потужності привода), а також конструктивних і технологічних факторів. Визначення полягає у характеристиці поля концентрації й температури, теплового потоку, виходу продукту замішування, тривалості замішування відповідно до розрахункових величин, вимог технології.

На основі узагальненого підходу до процесів, що відбуваються в існуючих машинах, дало поштовх до розроблення нового покоління тістомісильних машин. Функціональні можливості даного класу машин дозволяють суттєво розширити область їх застосування і створити нові методи регулювання їхньої структури та властивостей. Виходячи з цього, створення дискретних тістомісильних машин потребує глибокого вивчення механізму конструктивно технологічного забезпечення процесів в умовах впливу різних зовнішніх факторів.

У новій машині дискретної дії можливі різні напрямки дослідження утворення тіста, що контролюються в робочій камері при сприянні пластифікатора. Запропонована схема комплексу досліджень має на меті розкрити можливі фактори оптимізації процесу утворення тіста в робочій камері тістомісильної безлопатевої машини дискретної дії та уточнити особливості процесу в цілому. На основі запропонованої схеми в роботі розглянуто шляхи та методи визначення якості замішування тіста й напрямки його удосконалення. Значна частина роботи присвячена розкриттю стадійності, математичному моделюванню процесу замішування та розробленню методик визначення якості утворення тіста.

РОЗДІЛ 1

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ДЛЯ ПОБУДОВИ БЕЗЛОПАТЕВИХ ТІСТОМІСИЛЬНИХ МАШИН

1.1. Структура тістомісильних машин та удосконалення конструктивних елементів

Тістомісильні машини займають одне з провідних місць у технологічній лінії при виготовленні хлібобулочних виробів. Якість замісу опари та тіста суттєво впливає на якість готових виробів. Основними етапами технологічного процесу замішування тіста є підготовка вихідних компонентів, їх дозування, перемішування. Однорідність тіста є основною вимогою якості, адже від того, наскільки рівномірно окремі компоненти будуть розподілені в основному об'ємі залежать характеристики отриманого готового продукту. Саме тому тістомісильна машина є найбільш відповідальним обладнанням технологічного ланцюга з виготовлення хлібобулочних виробів.

На сучасному етапі розвитку хлібопекарської промисловості для виробництва хлібобулочних виробів використовуються тістомісильні машини різних конструкцій [3,4]. Найпоширенішими є машини циклічної та безперервної дії. Причому, частіше зустрічаються періодичні (циклічні) тістомісильні машини з горизонтальним та вертикальним приводним валом. Вони характеризуються гнучкістю при роботі з компонентами різного складу, а циклічність процесу замішування дозволяє готувати їх в об'ємі, що дорівнює одному замісу. Для вивчення та удосконалення різного класу тістомісильних машин необхідно знати їх структуру та функціональне призначення окремих конструктивних елементів.

При сучасній різноманітності тістомісильних машин, що використовуються в хлібопекарській промисловості, їх можна класифікувати за загальними ознаками:

1. Характером (способом) дії на компоненти, що обробляються.
2. Структурою робочого циклу.
3. Ступенем механізації та автоматизації.
4. Принципом взаємозв'язку у виробничому потоці.
5. Функціональною ознакою.

Сучасні тістомісильні машини складаються в основному з дозуючих пристроїв, виконавчих механізмів з робочими органами, приводного механізму, а також пристроїв для управління, регулювання та блокування. Дозуючі пристрої призначені для безперервного або періодичного подавання рідких компонентів та борошна в робочу камеру тістомісильної машини. Вони повинні забезпечити кількісне і якісне дозування по масі (вазі) або об'єму вихідні компоненти, що подаються в робочу камеру машини залежно від рецептури замішуваного тіста.

В тістомісильних машинах компоненти замішуються спеціальними пристроями, які отримали назву робочих органів, що безпосередньо діють на них. У результаті дії змінюється їх форма, розміри, положення у просторі та фізико-механічні характеристики.

Крім перерахованих механізмів, сучасні тістомісильні машини мають ряд додаткових пристроїв для регулювання та налагодження її роботи, управління, пуску, зупинки, контролю, захисту та блокування. Пристрої захисту та блокування попереджують від невірної або несвоєчасної вмикає, вимикає окремих частин машини та захищають їх від поломки при аварії. Структурний аналіз кожної машини дозволяє побудувати її технологічну та кінематичну схеми. Визначити динамічні умови роботи всіх механізмів, вузлів та деталей, що необхідні для розрахунку та конструювання машин.

Проблема узгодження їх робочих режимів з параметрами сировини та іншими складовими рецептури вирішується різними винахідниками по-різному. Необхідно передбачити, щоб робочі органи машини виконували таку механічну дію на компоненти, яка буде спрямована на створення умов для різних процесів та операцій, пов'язаних певною послідовністю. Така машина забезпечить

прискорення процесів, економію праці та виробничих площ, зменшення втрат, зниження використання енергії та зменшення експлуатаційних витрат [5,22,31].

Аналіз існуючого обладнання та технологій показує, що в провідних фірмах-виробниках тістомісильної техніки для хлібопекарської галузі в даний час існує стійка тенденція до створення комп'ютерно-керованих технологічних машин та інтегральних технологій. Однак слід підкреслити, що робочі органи існуючих машин мають постійну і незмінну геометричну форму. Регулюється в таких машинах лише число обертів приводного валу.

Цілком очевидно, що такі технічні вирішення нічого принципово нового не дають, але серйозно ускладнюють кінематику машини, її обслуговування та керування. Проте природні обмеження, пов'язані зі швидкостями протікання в тісті фізико-хімічних, біохімічних та інших процесів, є серйозною перешкодою для подальшого розвитку цього напрямку.

Аналіз якості хлібобулочних виробів підтверджує, що багато технологічних процесів замішування вже досягли або наблизилися до своїх граничних параметрів. Спроба подальшого їх прискорення за рахунок інтенсифікації роботи машин шляхом підвищення робочих параметрів може призвести до суттєвого погіршення якості готових виробів.

З короткого аналізу особливостей і стану сучасного обладнання і способів процесу замішування випливає, що проблема пошуку нових напрямків у харчовому машинобудуванні і способів замішування, які б вирішили частково або повністю перераховані проблеми, як і раніше надзвичайно актуальна.

На сьогодні існує необхідність розроблення методики аналізу системи управління процесом замішування на основі методів, що існують. Для цього необхідно досліджувати теоретичні аспекти процесу замішування і виявити регульовані параметри, що найповніше оцінюють якість кінцевого продукту. На рисунку 1.1 наведено схема вдосконалення замішування, яка складена на основі аналізу впливу на середовище.

Борошно для виробництва хлібобулочних виробів із зерна вітчизняного виробництва має різні якісні параметри і властивості навіть для одного

конкретного регіону. Крім того, в процесі зберігання і переробки властивості й параметри сировини також змінюються. Борошно та необхідні за рецептурою компоненти в існуючих тістомісильних машинах піддаються інтенсивному впливові металевих робочих органів (шнеки, лопаті, ребристі ротори, гвинтові, спіральні й т.д.).

Для надання виробу більшої привабливості, виробники стали застосовувати різні добавки до рецептури, що впливає на смак, колір, запах. Особливо ця проблема актуальна при використанні низькоякісної сировини й низькоякісного технологічного обладнання. Тому до машин і технологій пред'являються підвищені вимоги щодо збереження біологічної цінності переробної сировини й отримання з неї готових виробів, безпечних для здоров'я людини.

Перераховані вище проблеми, а також вимоги до енергозбереження, захисту навколишнього середовища, економії та скорочення виробничих площ, обслуговуючого персоналу і термінів освоєння нових видів продукції при одночасному зниженні якості вітчизняної сировини є досить гострою проблемою створення нового покоління тістомісильних машин з регулюючими в широкому діапазоні робочими параметрами процесів замішування. За наявності подібних машин з'являється можливість вирішувати і наступну актуальну проблему розроблення і створення нових технологій у хлібопекарській промисловості.

Функціональна схема тістомісильних машин «робоча камера – робочий орган – привод робочого органу» є класичною. У сучасних машинах робочий орган має постійну й незмінну геометричну форму, певне місце й просторову орієнтацію в ємності. За класичною схемою побудовані, наприклад, тістомісильні машини А2-ХТБ, ІС-120, ДК, І8-ХТА, А2-ХТТ та машини європейських виробників. За таких схем можна регулювати тільки число обертів її робочого органу. У відомих вітчизняних тістомісильних машинах число обертів в основному не регулюється. Таким чином, практично відсутня можливість впливати на якість перемішування. Проблема узгодження їх робочих режимів з параметрами сировини та іншими складовими рецептури вирішується різними винахідниками по-різному.

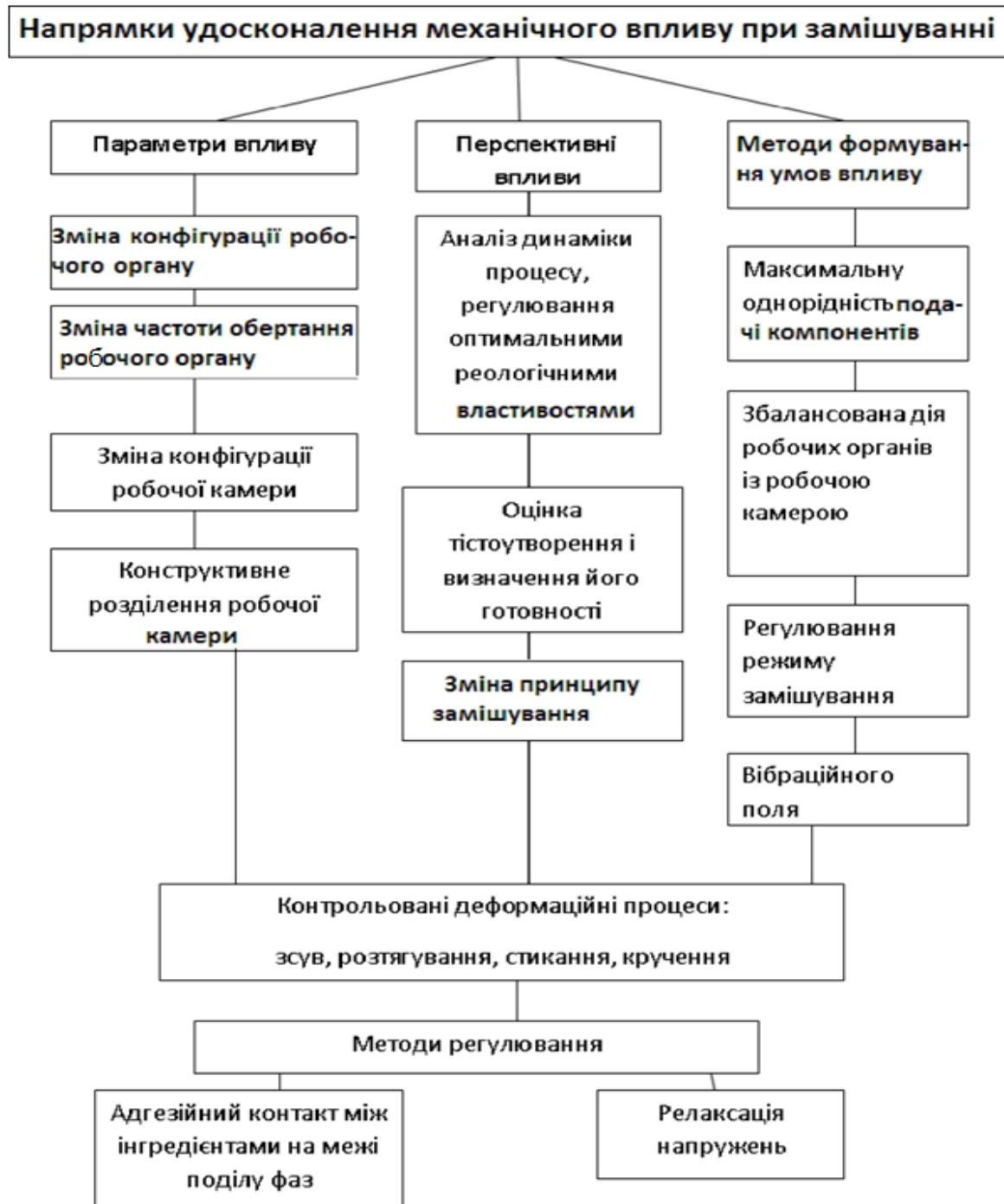


Рис. 1.1. Зв'язки параметрів впливу на процес змішування та шляхи їх удосконалення

На сьогодні процеси змішування компонентів можна виділити у галузь, яка базується на вивченні механічних процесів, мета яких – забезпечення максимального рівня суміщення окремих компонентів у кінцевій суміші (тісті). Головним критерієм ефективності тістомісильної машини, окрім цього, є витрати енергії, необхідної для отримання тіста з необхідним рівнем однорідності. При цьому найефективнішим буде та машина, у якої оптимально поєднані максимальна інтенсивність впливу робочого органу на оброблювану суміш компонентів, мінімальний рівень енергоспоживання та необхідна якість готової продукції.

При розробленні нових тістомісильних машин виникає проблема у виборі того чи іншого робочого органу, робочої камери машини. Це значно сповільнює процес проектування нового обладнання, а в деяких випадках не дає необхідного результату, адже вибір робочих органів відбувається інтуїтивно, за допомогою практичних дослідів.

Будь-яке технологічне обладнання, в тому числі й обладнання для замішування, повинно забезпечувати якісне виконання операцій технологічного процесу з найменшими витратами енергії на одиницю продукції, що випускається при максимальній продуктивності. Машини повинні мати високу техніко-економічну ефективність, зумовлену наступними параметрами, які відносяться до потужності машини: площею, що займається, витратами електроенергії, води, вартістю виготовлення, монтажем, ремонтом та експлуатацією обладнання. Під площею, яка займається, розуміють не тільки площу зайняту самою машиною, але й площу, яку необхідно тримати вільною для технічної експлуатації машини.

Технологічне обладнання повинно відповідати сучасним вимогам із надійності машин та апаратів. Крім загальних вимог, які ставлять до машин для виробництва харчових продуктів при проектуванні, виготовленні та експлуатації, вони повинні відповідати ще й таким вимогам:

1. Можливості виконання процесів при використанні прогресивної технології замішування тіста. Інакше кажучи, тістомісильні машини при повній їх потужності повинні технологічно оптимально діяти на тісто, що замішується, а втрати повинні бути мінімальними. В силу цього при конструюванні нових або модернізації діючих машин необхідно при оптимальному режимі технологічного процесу замішування забезпечити відповідні швидкості й траєкторії руху компонентів і робочих органів. Тісто повинно володіти якісними фізико-механічними, хімічними та біологічними властивостями, визначати подальший технологічний процес та кінцевий продукт – хліб.

2. Високій техніко-економічній ефективності. Її підвищення відображається на рості продуктивності, в зниженні витрат на одиницю продукції.

3. Особливим вимогам до зносостійкості матеріалів робочих органів, що повинна бути дуже високою. Робочі органи, які взаємодіють з компонентами, виготовляються з зносостійких матеріалів.

4. Можливості передавання руху машині безпосередньо від індивідуального або групового електродвигуна, що у багатьох випадках поліпшує конструкцію машин та підвищує їх експлуатаційні показники.

5. Відповідності машини вимогам, які викладені в правилах охорони праці та забезпечення виробничої санітарії.

6. Автоматизації контролю та регулювання робочих процесів.

8. Статичному або динамічному врівноваженню частин, які обертаються, та мас машин, які рухаються поступально.

На основі вивчення конструктивних параметрів існуючих машин запропоновано обґрунтований підхід до удосконалення машин та процесу (рис.1.2).



Рис. 1.2. Напрямки удосконалення тістомісильних машин

1.2. Вплив основних методів інтенсифікації на процес замішування

При проведенні замішування всі явища можуть бути розглянуті з точки зору фізико – хімічних властивостей. Вони визначають швидкість протікання процесу на молекулярному рівні й у локальному обсязі робочої камери машини, що містить достатню кількість включень дисперсного середовища. Даний рівень кількісно оцінюється коефіцієнтами дифузії, в'язкості, умовами рівноваги

системи і т.д. Кінетика міжфазового перенесення на кордоні поверхні описується моделями, що визначаються коефіцієнтами молекулярного й турбулентного обміну на поверхні взаємодії фаз [6,7,8]. При цьому враховується термодинаміка поверхневих явищ, що вказує на оцінювання методів інтенсифікації, які спрямовані на організацію та розвиток міжфазної поверхні. Тому вивчення явищ, що протікають у робочій камері тістомісильної машини або на окремих її стадіях, визначається, в основному, гідродинамічною структурою потоків.

Основу процесів складають математичні описи структури потоків за допомогою типових гідродинамічних моделей [59,132]. Це – модель ідеального перемішування, модель ідеального витіснення, однопараметричні і двопараметричні дифузійні моделі, осередкова модель. Дифузійна модель описує потоки з поздовжнім і поперечним перемішуваннями часток потоку (компонентів), де інтенсивність оцінюється коефіцієнтами поздовжнього і поперечного перемішування, або за допомогою безрозмірного комплексу – числа Re .

В робочих камерах існуючих тістомісильних машин з хаотичним рухом фаз відбувається зміна концентрації борошна при взаємодії з рідкими компонентами по довжині робочої частини місильного органу. Відповідно до рівня перемішування потоків змінюється і залежність загальної ефективності контакту фаз. Експериментально знайдені параметри математичних моделей дають можливість зробити розрахунок зміни поля концентрацій в системі [92]. Найбільш вивчена гідродинамічна структура потоків рідини з перехресною і протитечійною взаємодією фаз, меншою мірою - при перехресно-прямотечійною і прямотечійною. Рівень перемішування і параметри дифузійної моделі значною мірою визначаються конструкцією робочої камери й місильного органу.

В існуючих тістомісильних машинах визначальним суттєвим впливом на характер та швидкість утворення в'язкості, щільності, поверхневого натягу тіста є залежність від її гідродинамічних і конструктивних параметрів. Дана складна структура реальних потоків з неврегульованою гідродинамікою при наявності застійних зон та різного характеру циркуляційних потоків не дозволяє за

допомогою існуючих моделей відтворити з достатньою точністю гідродинамічну обстановку в робочій камері. У таких випадках використовуються комбіновані гідродинамічні моделі, що є комбінаціями найпростіших моделей і являють собою сукупність зон ідеального змішування, витіснення, що пов'язані між собою перехресними й рециркуляційними потоками [127].

При дії структури складних потоків необхідно визначити кількість зон та час перебування в них, взаємозв'язок між ними, характерні особливості окремих потоків, наявність застійних зон і т. д.

Встановлено [7,8], що структури потоків, які складаються із зон з різними параметрами перемішування, з'єднаних за принципом паралельного і послідовного надходження твердої і рідкої фаз, сприяють ефективності процесу. Аналіз гідродинамічної обстановки в робочій камері й математичний опис протікання в них процесів дозволяє якісно та кількісно оцінити відповідний напрям та встановити методи й засоби інтенсифікації процесу замішування.

Технологічний процес замішування може характеризуватися як постійними, так і періодично змінними параметрами. Для досягнення цього стану необхідна зміна параметрів в окремі моменти часу за умови їх періодичності й монотонності. При такому управлінні процесом, коли свідомо створюється нестационарний режим, можна отримати певну перевагу: збільшення ефективності змішування і продуктивності машини, вирівнювання профілю швидкостей, що сприяє покращенню якості тіста. Отже, розширюється можливість регулювання процесом за рахунок збільшення керованих параметрів.

Гідродинамічні нестабільні режими взаємодії фаз можуть бути реалізовані в робочій камері при імпульсній і циклічній зміні стискання суміші компонентів [87], при дискретному введенні потоків фаз [8,9,109], дискретно - імпульсному введенні енергії робочим органом, коливальних режимах взаємодії фаз [23,134]. Це призводить до рівномірного рідинного потоку по цілому об'єму робочої камери. Знижує поперечні та поздовжні нерівномірності, сприяє кращому перемішуванню рідких компонентів з борошном, що позитивно позначається на

ефективності процесу замішування. Даний режим процесу можна здійснювати методами встановлення гальмівних лопатей, клапанів на виході з циліндричної робочої камери, застосуванням спеціальних зрошувачів, наприклад, зі використанням принципу розпилення компонентів [127,129]. Це сприяє утворенню вимушених коливань у робочій камері.

Встановлено [58,60], що найефективнішою формою механічного впливу на процес замішування є періодичні механічні коливання маси компонентів, які характерно змінюють структуроутворення і якість тіста. Віброколивання інтенсифікують масообмін, створюють сприятливі умови для замішування. Наближення частоти вимушених коливань до частоти власних коливань елементів борошно - рідинний шар супроводжується інтенсифікацією процесу масопереносу. Накладання пульсацій на борошно - рідинний шар за допомогою коливань без механічних вібраторів суттєво збільшує зміну концентрації [128]. Така дія можлива в результаті руху компонентів по ребристій поверхні робочої камери і часткової дії вібродозатора борошна.

Час і частота впливу на замішування компонентів таким методом регулюється тривалістю вібродозування борошна та зміною частоти обертання місильного барабана. Особливістю такої роботи є те, що при дозуванні компонентів у робочу камеру вони безпосередньо контактують із збудником коливання, періодично отримують імпульс, передають імпульс іншим шарам компонентів. Завдяки цьому в суміші компонентів розповсюджуються хвилі, що викликають інтенсивні коливання й циркуляцію.

Встановлено [110], що при цьому змінюються не тільки реологічні властивості, але й сам характер процесу формування структури тіста. Для забезпечення об'ємного вібраційного змішування робоча камера повинна бути мінімального діаметру з максимально розвиненою поверхнею, що передає вібрацію.

Таким чином, режими, коли характер взаємодії потоків у робочій камері в певні моменти відбуваються один за одним з певним часовим періодом є ідентичні і здійснюються відповідно до розробленого алгоритму, тобто

дискретні, можуть істотно підвищувати ефективність і продуктивність процесу замішування [127]. На основі розглянутих факторів запропоновано класифікація методів інтенсифікації (рис. 1.3).

Інтенсифікація масообмінних процесів у діючих тістомісильних машинах, розроблення нових конструкцій машин і їх елементів нерозривно пов'язані з раціональною тактикою використання того або іншого прийому інтенсифікації. Підвищуючи продуктивність і ефективність тістомісильних машин, неможливо не враховувати завдання технології, що пов'язано з підвищенням якості тіста, хліба і напівфабрикатів, зниженням енергоємності виробництва.

Застосування певного прийому інтенсифікації вимагає глибокого прорахунку питань, пов'язаних з мікрокінетикою й макрокінетикою масообмінного процесу, з метою з'ясування факторів, що лімітують процес. Аналіз основних методів інтенсифікації, що впливають на гідродинамічну обстановку в робочій камері, дозволяє зробити висновок, що, в основному, вони спрямовані на розвиток міжфазної поверхні, організацію раціональної структури потоків і гідродинамічно нестабільних режимів взаємодії фаз.

Досить перспективно з погляду інтенсифікації процесу замішування контактного рівня є використання спрямованого вводу фаз компонентів у робочу камеру, контролювання потоків, створення додаткової зони контакту. Великий інтерес, викликаний останнім часом, пов'язаний з гідродинамічно нестабільними режимами взаємодії фаз (Діосна), і, зокрема, організацією контрольованих циклічних процесів, зумовлених при досить значних витратах на їхнє здійснення в існуючих тістомісильних машинах.

Водночас використання контрольованих циклічних процесів не впроваджується через недостатнє теоретичне розроблення та відсутність необхідної кількості експериментальних досліджень гідродинаміки, структури потоків і умов масообміну на рівні контакту робочої камери й робочого органу в цілому.



Рис. 1.3. Вплив технологічних факторів на методи й засоби інтенсифікації процесу

Усі розглянуті фактори дають цілий комплекс напрямків інтенсифікації процесу та принцип побудови тістомісильних машин з безлопатевим робочим органом (БРО). Базою є кінематичний аналіз деяких видів руху хвилеподібного деформування на поверхні багатогранної робочої камери. Конструкція робочої камери повинна мати пасивний вібраційний пристрій з керованим механізмом, що кінематично визначає рух рідини.

Для переходу робочого органу в коливальний рух застосовуються відомі способи віброзбудження: кінематичний, динамічний, параметричний, автоколивальний. Найбільшого поширення у тістомісильних машинах у даний час отримали перші два способи віброзбудження - кінематичний і динамічний.

Рух хвиль, утворених робочим органом, визначається основними параметрами: формою і величиною поверхні деформації, обсягом простору робочої камери. Цю умову можна пояснити формою спірального РО. У місці

його дії компоненти хвилеподібно деформуються. Новоутворена таким чином хвиля деформації має форму й величину поверхні, а також об'єм обмеженого простору. Це свідчить про те, що хвилі на поверхні рідини утворюються не тільки при обертальному русі, але й при поступальному русі робочого органу.

При різних режимах течії перемішування рідин розглядаються результати двох процесів: потоку та пульсуючого руху різних масштабів. Напрямок швидкостей цих рухів змінний як у часі кожної стадії замішування, так і в просторі. Тому пульсуючий рух і його інтенсивність безпосередньо пов'язані з характеристикою середньої течії. Бо зміна швидкості рідини за величиною й напрямком має хаотичний характер і потік являє собою сукупність неупорядкованих рухів різної величини.

Неупорядкований характер руху елементів рідини в потоці, постійна наявність у ньому незатухаючих коливань визначає високу інтенсивність обміну енергії, маси та імпульсу в усіх напрямках. Це дозволяє нам сформулювати наукові напрямки процесу інтенсифікації замішування:

- вибір і обґрунтування доцільності застосування найперспективніших методів інтенсифікації з метою вдосконалення процесу замішування;
- підвищення ефективності й продуктивності тістомісильних машин на основі комплексного використання зазначених вище режимних методів інтенсифікації й організації контрольованих циклічних процесів;
- теоретичне й експериментальне дослідження явищ, що протікають у них;
- впровадження у виробництво, налагодження, промислові випробування тістомісильних машин.

Базуючись на детальному вивченні механізму замішування і обґрунтуванні його раціональних параметрів, розроблено класифікаційну схему основних напрямів і відповідних методів інтенсифікації процесу замішування, що наведені на рис. 1.4.

Проведений аналіз дозволив встановити, що методи інтенсифікації формування гідродинамічного руху в робочій камері чи на окремих її ділянках в основному спрямовані на отримання поверхні контакту фаз та її поверхневий розвиток, поля концентрацій і раціональної структури потоків взаємодіючих фаз.

1.3. Розвиток конструктивних схем для безлопатевого замішування

Високі вимоги до якості замішування зумовлюють труднощі вибору ефективного технологічного процесу й устаткування. Тому створення умов для інтенсифікації процесів замішування тіста, застосування ефективних механічних методів дії на компоненти, ліквідація непродуктивної праці, тобто створення ресурсозберігаючих технологій замішування компонентів є важливим завданням розвитку удосконалення технологічних процесів і тістомісильних машин у хлібопекарській галузі.

З урахуванням вищевикладеного, очевидна актуальність і перспективність вирішення проблеми. Тому постійно проводиться інженерний і науковий пошук удосконалення технологій замішування тіста, розроблення нових машин і принципів роботи, що забезпечують підвищення їх ефективності й продуктивності.



Рис. 1.4. Вплив конструктивних факторів на методи і засоби інтенсифікації процесу

Роботи створення технологічних процесів і устаткування важливі й актуальні. Багатолітній досвід використання розробок Лісовенка О.Т., Козлова Г.Ф., Мачихіна С.О., Скорикової А.І., Ковбаси В.М., Юрчак В.Г., Дробот В.І., Ройтера І.М. і багатьох інших учених дозволив створити умови для вирішення цієї проблеми. Проте в сучасний період ринкових стосунків процес інтенсивного замішування тіста став серйозною перешкодою в створенні нових технологічних процесів його приготування.

Так завдання може бути вирішене впровадженням прогресивного технологічного процесу й устаткуванням. Здійснення нових конструкцій робочих органів дозволяє проводити замішування тіста безперервним потоком у процесі колового транспортування у багатогранній циліндричній робочій камері з ефектом вібрації. Можливість поєднання таких функцій реалізується за рахунок використання безлопатевого робочого органу у вигляді барабана, що обертається в багатогранній робочій камері з плоских елементів з'єднаних боковинами.

Такі робочі органи названі безлопатевим барабаном. Унікальні можливості такої конструкції машини дозволяють здійснювати в процесі замішування інтенсивну обробку компонентів із використанням коливальних процесів.

Оскільки коливальні ефекти найперспективніший метод механічної дії на змішування компонентів, що забезпечує швидке протікання технологічних процесів. Тому одним зі прогресивних напрямків удосконалення тістомісильних машин є вібраційні ефекти. Такі машини не лише забезпечать високу питому продуктивність при відносно низьких енерговитратах, але мають значно менші габарити в порівнянні з існуючими та володіють певними перевагами в якості замішування.

Рішення проблеми слід шукати в нестандартних вирішеннях пошуку оригінальних конструкцій машин і технологій, що забезпечують інтенсифікацію замішування. Таке завдання може бути вирішене за допомогою робочих органів, форма яких є циліндр, конус з гладкою поверхнею або з насічками різних геометричних профілів. За рахунок оригінальної геометрії вони забезпечать рух компонентів у багатогранній циліндричній робочій камері. Нестандартні форми

руху компонентів, впливають на значну активність їх взаємодії. Такі оригінальні робочі органи машин зберігають позитивні характеристики – простоту виготовлення, експлуатації, незначні втрати при передаванні енергії від двигуна до масових частинок компонентів.

Конструкція робочої камери дозволяє створювати циркуляційний рух, дискретне стискання з ефектами пасивної вібрації на тісто, витіканням змішуваних компонентів через профільний канал, що утворює пасивний вібраційний пристрій (пластифікатор).

Новизна пропонованої конструкції тістомісильної машини на базі безлопатевого змішування зумовлена тим, що елементи, з яких складено робочу камеру, змонтовані під деякими кутами не лише один до одного, але й до осі обертання барабана. Тому інтенсивність змішування часток компонентів зростає. Оскільки площа, форма і розміри прохідного перетину формуючого каналу камери по її довжині змінюється від завантаження часток компонентів до їх вивантаження, то інтенсифікується процес їх змішування. Збільшується не лише активність взаємодії часток одна з одною й зі стінками барабана і камери, але й змінюється частота їх взаємодії та амплітуда руху (розділ 2, рис. 2.1).

1.3.1. Принцип побудови тістомісильних машин з безлопатевим робочим органом

Принципи, закладені в основу переважної більшості відомих машин і механізмів інтенсивної механічної дії при змішуванні, були розкриті понад півстоліття тому. Успішне вирішення завдань проектування тістомісильної техніки починається з використання системи конструкторської документації, вивчення стандартів і вмілого застосування довідкової літератури. Конструювання тістомісильної машини необхідно починати з робочої камери і внутрішніх контактних поверхонь. Обов'язковою умовою можна вважати її геометричні розміри, конструкцію робочого органу, що забезпечать задану продуктивність.

Сучасні тенденції прогресу базуються на системному підході у розв'язанні важливого комплексу оптимізаційних задач, що можуть бути сформульовані у вигляді графічних або функціональних залежностей. Створення нової конструкції починається з використання елементів геометричного моделювання поверхні [23,48,127]. Як правило, початковим етапом є визначення (обмеження) робочого простору, від якого залежать результати технологічного процесу замішування. Робочий простір у сучасних діжах є визначеної форми, розмірів, що розраховані для технологічних умов, економічних можливостей і подальшої ціленаправленої експлуатації.

На практиці необхідність оптимізації процесу замішування пов'язана з якістю утворення тіста при мінімальних затратах механічної енергії. Оптимізація різних шляхів замішування дозволяє при їх визначенні коригувати вибір конструктивних, фізико-механічних, режимних, енергетичних параметрів. У зв'язку з тим, що конструктивно-геометрична складова є основою проектування обладнання, геометрія різних поверхонь робочої камери й робочого органу є в пошуках сучасних форм. Технічне вирішення повинно відображати якісний вихід готової продукції.

Встановлено [56], що при однаковій частоті обертання робочого органу та з різною масою завантаження робочої камери швидше досягається замішування з необхідним рівнем одорідності при великій площі контакту. Ускладнення геометрії поверхонь, а саме наявність різних різких конструктивних переходів, призводить до появи негативних моментів – мертвих зон у робочій області камери, що погано впливає на якість.

Дійсно, чим більша поверхня контакту суміші з робочою поверхнею машини, тим інтенсивніше проходить процес змішування, отже, можна змінювати продуктивність, впливати на проходження усього процесу. Тому увага конструкторів в останні роки спрямована на нові напрямки розробок, Одним із них є створення машин і технологій, що використовують хвилеподібний рух, таких, як хвильові передачі та рушії, хвильові віброконвеєрні транспортно-технологічні машини [18,23]. В основі їхньої дії лежить аналог

хвильового руху заданого профілю робочого елемента під дією зовнішніх механічних сил.

У цих розробках є значний розрив між кількістю винаходів і створених машин, що вказує на часту невідповідність конструкторського прогнозу їх динамічному руху. Це спонукає до розвитку теорії хвиль стосовно конструкцій різних робочих органів і камер машин. Розвиток фізико-математичних основ теорії хвиль в елементах машин, виявлення й вивчення хвильових ефектів дозволяє не тільки правильно їх враховувати при проектуванні, але й відкриває можливості для створення машин даного цільового призначення, що працюють за хвильовим принципом.

Розроблення адекватних методів вирішення таких крайових завдань вимагає встановлення й вивчення досить повного набору хвильових ефектів у пружних елементах машин, так як вони мають специфічні особливості прояву й вимагають подальшого вивчення з метою правильного їхнього обліку. Зазначені методи можуть бути покладені в основу руху тіл, принципу дії машин, приладів і технологій.

Наявність біжучих поздовжньо-зміщених хвиль у середовищі встановлюють робочі органи машини при їх обертанні по еліптичних траєкторіях та одночасному обертовому руху діжі. Причому напрямок встановлення залежить від напрямку поширення хвиль і зміни форми коливань. При поширенні пружних властивостей хвиль має місце перетворення їхньої енергії в енергію колового руху, що відкриває можливості на основі цих ефектів створювати потоки вібрації [23,127].

У поперечних хвилях відбувається зсув шарів середовища одного відносно другого. Тобто вони по суті є хвилями деформації зсуву [132]. Пружні сили тіста, що протидіють відносному переміщенню його шарів, намагаються зберегти свою форму. При розповсюдженні хвиль напружено-деформований стан шарів тіста характеризується чергуванням процесу стискування й розтягу. Змінюючи таким чином свій об'єм, поздовжні хвилі стають хвилями об'ємної деформації.

Чергування деформації стискування і розтягу супроводжується відповідними змінами тиску.

Використання вібротехнології зумовлюється потребами створення сприятливих умов для інтенсифікації процесу замішування тіста. Застосування ефективних методів дії дозволяє реалізувати динамічність та спрямованість технологічного процесу виробництва хліба. Унікальні можливості вібраційного поля дозволяють успішно здійснювати не тільки перемішування, але й такі операції, як вібротранспортування, гомогенізацію, насичення повітрям.

Рух хвиль, утворених робочим органом, визначається основними параметрами: формою і величиною поверхні деформації, обсягом простору робочої камери. Цю умову можна пояснити формою спірального робочого органу. У місці його дії компоненти хвилеподібно деформуються. Новоутворена таким чином хвиля деформації має форму і величину поверхні, а також об'єм обмеженого простору. Це свідчить про те, що хвилі на поверхні рідини можна утворювати не тільки при обертальному русі, але й при поступальному русі робочого органу.

При різних режимах течії перемішування рідин розглядається результат двох процесів: перенесенню досить великого об'єму рідини з направленим потоком і прикладених до неї пульсуючих рухів різних масштабів. Напрямок у швидкості цих рухів змінний як у часі, так і просторі. Тому пульсуючий рух і його інтенсивність безпосередньо пов'язані з характеристикою течії. Так як зміна швидкості рідини по величині і напрямку має хаотичний характер, то потік являє собою сукупність невпорядкованих рухів різної величини. Невпорядкований характер руху елементів рідини в потоці, постійна наявність у ньому незатухаючих коливань, визначає високу інтенсивність обміну енергії, маси та імпульсу в усіх напрямках.

Основним елементом конструкції тістомісильних машин дискретної дії є формувальна хвильова поверхня робочої камери, в якій створюються хвильові рухи безлопатевим робочим органом (рис.1.5). Картина руху створюється в результаті коливань робочої суміші по поверхні робочої камери відносно

певного центру дії робочого органу в поздовжньому та поперечному напрямках. При цьому суміш переміщується відносно сусідньої з деяким зсувом по фазі.

В загальному випадку при дії обертового безлопатевого робочого органу процес транспортування утвореного тіста формується поздовжніми хвилями на транспортувальній поверхні камери. Поперечні хвилі керуються взаємодією несучої поверхні робочого органу з тістом за рахунок періодичної зміни його стискання на поверхні пластифікатора. Поздовжні хвилі формують швидкість переміщення. Конфігурація хвилі й транспортні можливості встановлюються параметрами поздовжніх хвиль.

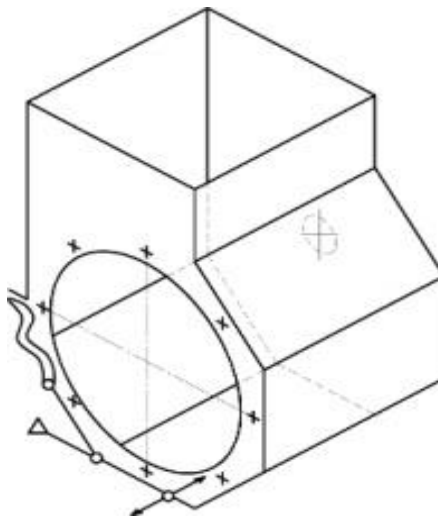


Рис. 1.5. Схема багатогранної робочої камери.

Багатогранна циліндрична робоча камера сприяє інтенсифікації процесу із-за дискретної зміни форми розповсюдження поздовжніх деформацій, стискання, кручення, розтягування, розкачування тіста. Ці процеси забезпечують ефективну обробку компонентів. Одночасно зменшує пошкоджуваність клейковини, створює унікальні умови підвищення продуктивності замішування.

Таким чином, серед основних напрямів удосконалення розвитку тістомісильних машин є створення вібраційно-хвильового руху рідини в робочій камері з безлопатевим робочим органом.

1.3.2. Конструктивні особливості безопатевого замішування

В основі реалізації інтенсифікації технології замішування має бути дія вібраційного поля, тобто заданий амплітудно-частотний режим коливань на змішуванні компоненти. Ця дія відбувається або за рахунок безпосереднього впливу вібрації на компоненти, або за рахунок дії спеціально підбраного вібратора, коливальні рухи якого визначають інтенсивність процесу змішування. Найбільш близьким за суттю здійснення до вібраційного замішування є хвильовий конвеєр [127]. Основними елементами цього типу машин є гвинтова деформуюча камера, зроблена з рівносторонніх трикутників. Вона своєю конструкцією створює хвильові рухи (рис. 1.6).

Картина руху створюється в результаті коливань точок поверхні робочої камери відносно певного центру в поздовжньому та поперечному напрямках. При цьому кожна точка переміщується відносно сусідньої з деяким зсувом.

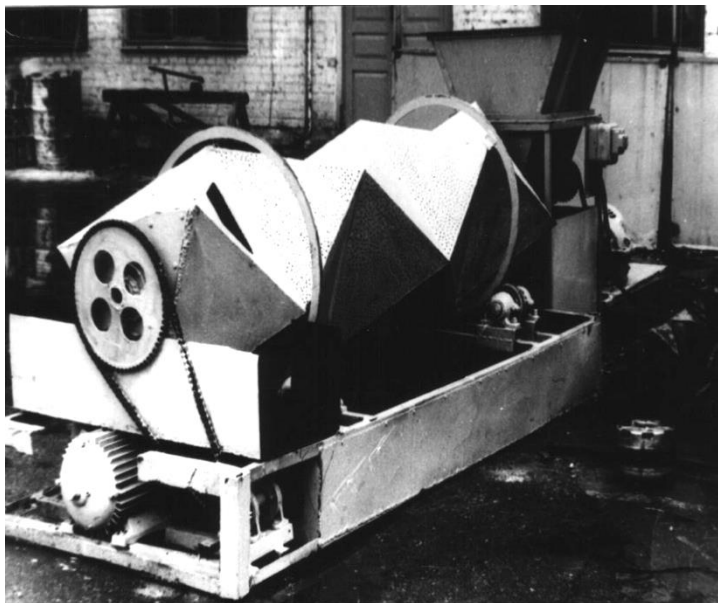


Рис.1.6. Віброхвильова машина для змішування компонентів кормів

Для розроблення нового покоління тістомісильних машин дискретної дії сформульовано такі напрямки:

- 1) розроблення і створення інтегральних технологічних процесів зі зміщенням кількох технологічних операцій у робочій камері машини при циркуляційному русі;

2) конструктивне розроблення відрізняється тим, що з метою збереження біологічної цінності борошна при замішуванні тіста із суміщенням ряду механічних впливів, робочі органи є циліндричної форми, що обертаються в багатогранній циліндричній робочій камері. Механізм створення деформацій тіста робочим органом і хвилястою робочою камерою динамічно зв'язані додатковим опором на виході з циліндричної камери, пластифікатором (пасивним вібраційним пристроєм);

3) розроблення принципів узгодження роботи новостворених машин це:- надання нових універсальних можливостей;- спрощення переходу із однієї рецептури на іншу;- періодичність або неперервність процесу;- злагодження роботи з іншими машинами технологічного процесу в часі і просторі;- виконання всіх можливостей високим механічним або електронним рівнем.

Розроблена конструкція багатогранної робочої камери та безлопатевого робочого органу в загальному випадку забезпечує процес транспортування компонентів, що формується як поперечними, так і поздовжніми хвилями на хвилеподібній поверхні камери. Утворення поперечних хвиль відбувається при взаємодії пластифікаційної поверхні пасивного вібраційного пристрою з компонентами за рахунок періодичної зміни тиску. Поздовжні хвилі формують швидкість переміщення. В даних значеннях основним критерієм є циліндричний робочий орган.

Конфігурація хвилі та її транспортні можливості визначаються параметрами їх взаємодії. Частоти коливань пружної системи зміщені відносно частоти джерела (ефект Доплера). Встановлено [23,62,146], що хвильове переміщення є більш загальним випадком транспортування, ніж вібрація. Вібраційне переміщення є приватний випадок хвильового транспортування, коли довжина робочого органу незначна відносно довжини хвилі. Таким чином, хвильове переміщення має більші різноманітності режимів, ніж вібраційне.

Хвильове переміщення в робочій камері утворюваного тіста досягається за рахунок утворених поперечних і поздовжніх стоячих та біжучих хвиль, що відповідає швидкості обертання робочого органу та швидкості руху

компонентів. У результаті сумарних дій, спрямованих в один бік, та під дією сил віддачі (пружина пластифікатора) відбувається рух компонентів та їх інтенсивне змішування. Така обстановка не тільки знижує сили внутрішнього тертя при замішуванні, але й забезпечує примусове вібропереміщення тіста профільним каналом машини.

На підставі аналізу основних гідродинамічних характеристик, що відбуваються в робочій камері, виходячи з умов стадійності замішування при забезпеченні мінімальних місцевих опорів, було обґрунтовано й спроектовано форму й основні конструктивні розміри багатогранної робочої камери для безлопатевого замішування.

Робоча камера являє собою дві боковинки з нержавійної сталі, що з'єднані між собою пластинками різних розмірів, утворюючи при цьому багатогранник (рис.1.7). Така зміна розмірності багатогранника створює хвилеподібний та коливальний рухи в камері машини. Ці режими супроводжуються нерівномірним розподілом потоку дозуючих компонентів по периметру камери, незначним градієнтом гідравлічного опору на пластинках багатогранника, нерівномірною інтенсивністю перемішування по периметру камери. Односпрямований рух, утворений робочим органом, збільшує час контакту фаз при збереженні довжини шляху рідких компонентів, що в певних умовах призводить до збільшення ефективності рівня контакту.

Принцип взаємодії потоків фаз базується на тому, що вони безупинно вдаряються в багатогранник, змінюючи при цьому напрямок руху. Усе це сприяє пригальмовуванню рідини, збільшенню часу перебування рідини в контакті, безперервному відновленню поверхні контакту фаз і зниженню нерівномірностей. Крім того, застосування даного методу дозволяє збільшити відносну швидкість руху фаз, що сприяє інтенсифікації міжфазного переносу.

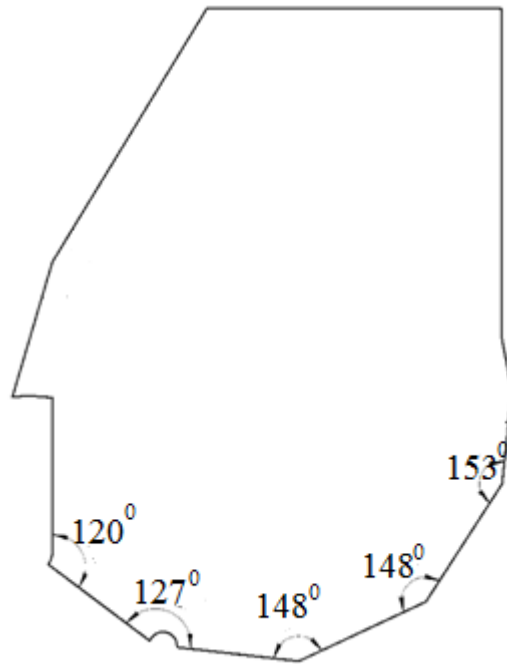


Рис.1.7. Схема розміщення пластинок багатогранної робочої камери

Таким чином, раціональне розташування похилих пластин до місильного барабана дозволяє створити додаткову зону контакту фаз. Теоретичні дослідження впливу геометричних параметрів контактних елементів - ширини й кута нахилу пластин, кроку їх розташування й величини зазору між пластиною й місильним барабаном дозволили визначити їхні оптимальні величини. Зокрема, зона контакту стійко забезпечується при установці пластин на відстані 45 - 60 мм від поверхні барабана.

1.3.3. Аналіз параметрів основних елементів безлопатевих тістомісильних машин

Технічні можливості сучасних тістомісильних машин і фізична можливість здійснення переходу до найдосконаліших параметрів процесів з об'ємною взаємодією робочого органу і компонентів є проблематичною. Тому створення принципово нового технологічного обладнання з транспортним та просторовим рухами і великою амплітудою, за рахунок виникнення сил взаємодії між частинками мас компонентів, забезпечить високу інтенсивність обробки.

Інтегральна організація процесу являє собою сумісництво окремих операцій в одній тістомісильній машині: транспортування, стискання, розтягування, закатування. Циклічний вплив на суміш компонентів у замкненому хвилеподібному контурі камери інтенсифікує механічну обробку тіста. Сумісництво операцій значно скорочує процес замішування при плавній деформації на тісто, що сприяє якості тіста й хліба.

Механізм деформації тіста в просторі між безлопатеvim робочим органом і робочою камерою пов'язаний таким чином, що при транспортуванні по циліндричному багатограннику йому надається змінна геометрична форма з вібраційно-хвильовим витіканням тіста в період його пластифікації. Таким чином, створюється принципово новий тип машини, який об'єднує цілий ряд традиційних операцій, що сприяє інтеграції технологічного процесу замішування тіста.

Геометричне моделювання робочих органів може проходити двома шляхами: використанням простих і складних (у вигляді комбінації кількох різних) поверхонь. Поставлене завдання може бути вирішене за умов: конструкцій робочого органу повинна забезпечити рух в камері машини найменшого об'єму суміші компонентів; поверхня робочого органу повинна бути без різких переходів, максимально розвиненою. Використання елементів геометричного моделювання дозволяє отримати робочі поверхні з великою віброактивною площею складної конфігурації, що визначає рівень змішування компонентів при їх контакті з нею.

Підхід до конструювання робочих поверхонь безлопатевого робочого органу ґрунтується на поєднанні транспортних і технологічних функцій. Це можливо реалізувати за рахунок його конструкції, що має вигляд циліндричної, конічної, бочкоподібної, гвинтової форми з гладкою або з різними насічками (рис.1.8).

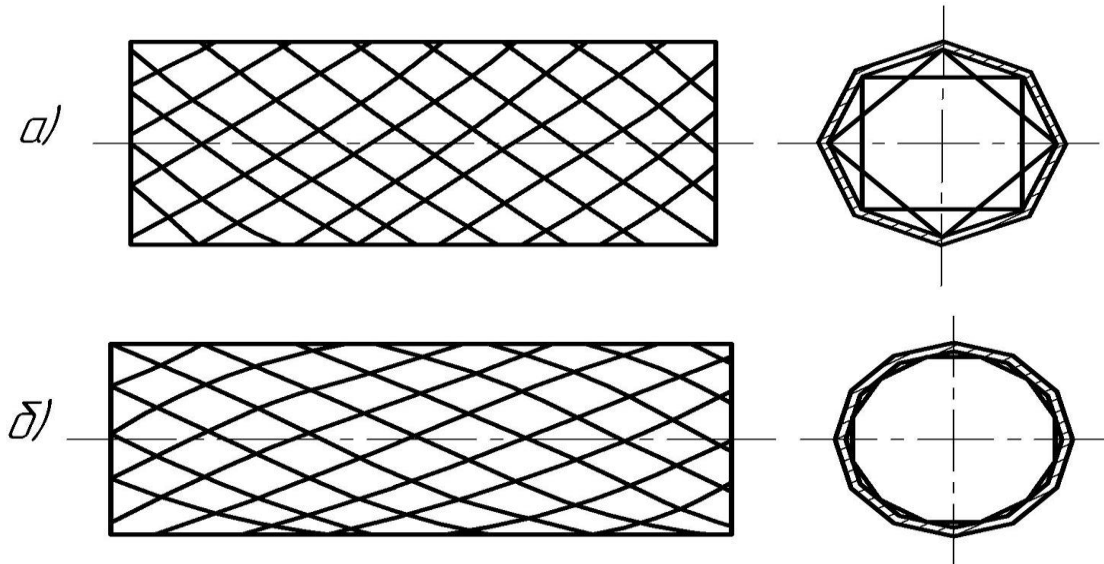


Рис.1.8. Схеми конструкцій циліндричних безлопатевих робочих органів

Насічки на місильному барабані служать для збільшення площі контакту з змішуваними компонентами та відповідного впливу на їх змінний рух з опором потоку. Площа повної поверхні місильного барабана розраховується як вільна від ребер насічки, віднесеної до одиниці довжини барабана. При накатуванні.

Площа вільна від насічок

$$F_{\epsilon} = 3,14 \cdot d_0 \left(1 - \frac{\delta}{t_p}\right),$$

де d_0 - діаметр місильного барабана по основі насічок; D - діаметр по зовнішній поверхні насічок; δ - середня товщина ребра насічки, 0,2мм; t - крок рифлів, 0,1мм.

Загальна площа місильного барабана $F_{\text{заг}} = F_p + F_{\epsilon}$.

Місильний барабан у вигляді пластинчастих насічок

$$F_p = 2 \cdot (\epsilon \cdot H - 0,785 d_0^2) \frac{1}{t_p}; \quad F_{\epsilon} = 3,14 \cdot d_0 \left(1 - \frac{\delta_p}{t_p}\right)$$

де ϵ - ширина пластини; H - висота пластини, 1-2мм; h - висота ребра; δ_p - товщина ребра, 0,4 – 0,5мм.

Проектуючи форму поверхні робочої камери машини, необхідно дотримування таких умов:

- корпус робочої камери повинен мати об'єм, що забезпечить задану продуктивність;
- при одному й тому ж корисному робочому об'ємі форму камери необхідно моделювати так, щоб площа її внутрішньої поверхні мала максимальну величину;
- при виборі форми поверхні робочої камери необхідно передбачити, щоб її внутрішня поверхня не сприяла утворенню мертвих (застійних) зон;
- в конструкції робочої камери необхідно передбачити проведення заміни робочого органу, що дає можливість інтенсифікувати процес замішування відповідно до якості сировини;
- для збільшення площі контакту необхідно, аби робоча камера була циліндричної форми у вигляді багатогранника.

Робочий орган, що горизонтально обертається у циліндричній багатогранній камері, сприяє цілеспрямованому створенню колового руху. Така конструкція характеризується тим, що поперечний переріз має форму багатогранника, який відносно осі обертання робочого органу має дискретно-змінну величину.

Конструкція робочої камери визначає направленість руху та швидкість компонентів при їх постійному контролі. Цей рух утворює деформацію зсуву і розтягу при тістоутворенні. Основою передавання механічної енергії робочим органом є те, що він не може передати більше енергії, так як пружні властивості пластифікуючої поверхні, що утворюються під дією сил пружини, постійно створюють допустимі навантаження. Основні конструктивні схеми розроблених камер такої форми наведені на рис 1.9.

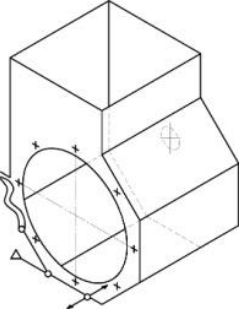
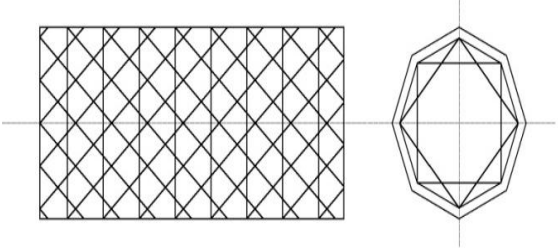
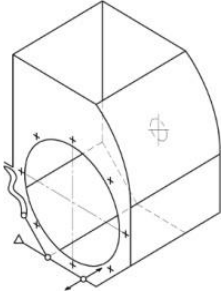
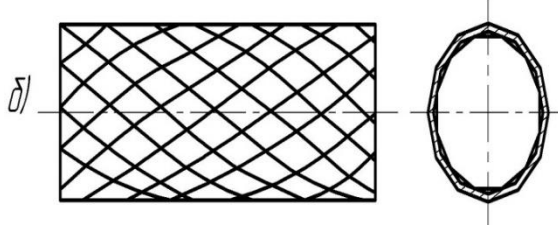
Конструкція робочої камери для безлопатевого замішування	Безлопатові робочі органи	Застосування
		Простота конструкції; Підвищення інтенсивності механічної дії; зменшення енерговитрат; зменшення часу процесу замішування
		Простота конструкції; підвищення інтенсивності механічної дії; зменшення енерговитрат; зменшення часу процесу замішування

Рис. 1.9. Схема камер і робочих органів з постійною по довжині кроком
гвинтових ліній

Комбінування пасивного вібраційного пристрою (ПВП) з геометричними параметрами плоских елементів робочої камери дозволяє сприяти рух утворюючого тіста з невеликою амплітудою, тобто збільшувати або зменшувати

транспортний чи технологічний ефект. Ці ефекти відбуваються на третій стадії замішування, що розглядається в роботі.

Основними робочими параметри в процесі стадійності замішування, що регулюються, є зміни об'єму зон робочої камери, зазору між робочим органом та корпусом камери. Розглянуті процеси замішування в тістомісильних машинах дискретної дії вказують на реалізацію в них широкого спектра силових параметрів вібрації з можливістю простоти регулювання амплітуди й частоти коливань.

Встановлено [86], що коливання передаються за рахунок пульсуючої дії утворюючого тіста, або перериванням потоку його за допомогою різних гальмівних лопатей (пластифікаторів), що монтуються відповідно до проходження процесу замішування в робочій камері. Враховуючи дослідні дані ряду вчених [85,148] та наші теоретичні дослідження встановлено, що основою конструктивних і технологічних схем у машинах дискретної дії буде:

- вібродозування компонентів;
- колова циркуляція компонентів;
- не лінійність колової циркуляції компонентів через наявності змінного зазору між робочою камерою (циліндричний багатогранник) і циліндричним робочим органом;
- створення коливань пульсуючим тиском при пластифікації тіста;
- самокерованість, де механічні коливання генеруються завдяки наявності пристрою, що забезпечує опір тісту в момент пластифікації.

Частота коливань регулюється стисненням тістом у профілюючому каналі, що утворюється в результаті дії робочого органу, амплітуда коливань - величиною зазору поверхні пластифікатора до поверхні барабана. Такий зв'язок дозволяє реалізувати широкий діапазон характеристик відновної пружної сили пружини на проходження процесу замішування. З урахуванням розробленого ПВП та концепції створення пристроїв для інтенсифікації процесу пластифікації розроблено відповідну методику (розділ 5) та вимоги побудови (рис.1.10). Застосування запропонованої конструкції ПВП і методики контролю відношення

рецептурних інгредієнтів при замішуванні тіста дозволяє інтенсифікувати дискретний процес тістоутворення, створювати вібраційне поле при ефективних ПВП.

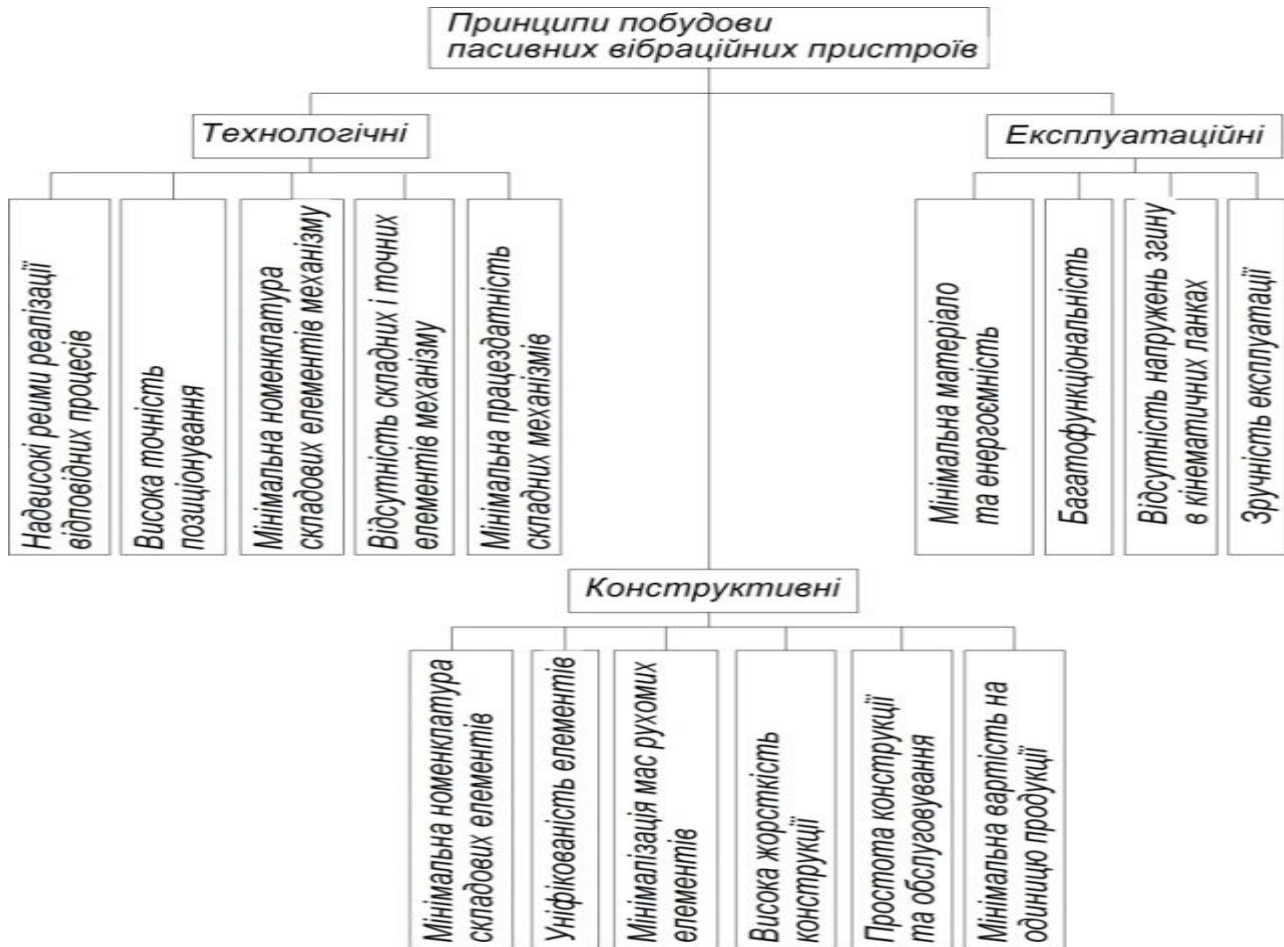


Рис. 1.10. Вимоги та принцип побудови пластифікатора (ПВП)

Керування зміною маси утворюючого тіста призводить до можливості регулювання параметрами деформації при експлуатації таких тістомісильних машин. Залежно від конструктивних особливостей пластифікатора та його розміщення в багатогранній робочій камері можна виділити: -пластифікатори із відсутністю можливості регулювання параметрів вібрації;

-пластифікатори з контактною передачею, що регулюються у не - обертовому стані;

- пластифікатори, що регулюються під час обертання робочого органу;

- самовстановлюючі пластифікатори, що дозволяють змінювати момент маси інерційного тіста залежно від зміни робочого режиму машини.

Розроблення нормально функціонуючої та економічно доцільної тістомісильної машини потребує комплексного аналізу її кінематичних, силових та енергетичних параметрів, які реалізуються в ході технологічних, економічних розрахунків, розрахунків на міцність та витривалість; при складанні енергетичного балансу потужностей.

1.3.4. Теоретичні основи стадійності процесу відносно вимог дискретного безлопатевого замішування

Складність процесів, що відбуваються при замішуванні в робочій камері дискретної безлопатевої тістомісильної машини, зумовлена специфічними властивостями тіста: липкістю, пружністю, еластичністю та пластичністю. Детальне вивчення даного методу замішування полягає у визначенні біохімічних закономірностей тістоутворення та впливу на нього посиленої обробки з одноразовим виконанням цілого комплексу заходів, які сприяють прискоренню визрівання тіста.

При замішуванні тіста на ДБТМ, на відміну від існуючих тістомісильних машин, мають відбуватися контрольовані деформаційні процеси. Основна відмінність зумовлена циклічністю дії робочого органу на тістоутворення, що здійснюється за порівняно короткий час, який обчислюється секундами або їх частинками. Для обґрунтування процесу необхідно проаналізувати робочий цикл та окремі операції й виділити ті, що найістотніше впливають на нього. Саме такий метод встановлює властивості тіста, що залежать від допустимих напружень зсуву, в'язкості у робочій камері безлопатевої машини [115,116,120].

Для полегшення аналізу закономірностей процесу замішування на ДБТМ та виявлення постадійних раціональних параметрів його забезпечення розроблено й запропоновано тристадійну модель (рис.1.11). Вона базується на сучасних розробках О.Т. Лісовенка, Х.Д. Чейшнера, Н. Квендта та інших. Не

зважаючи на глибоке вивчення окремих закономірностей теорії стадійності процесу замішування, до цього часу в загальному вона не опрацьована. Частково розв'язана проблема забезпечення інтенсивності замішування при вимушеному русі фаз гетерогенної системи. Розкрито вплив, з одного боку, на властивості системи, а з іншого, – на конструкцію тістомісильних машин.

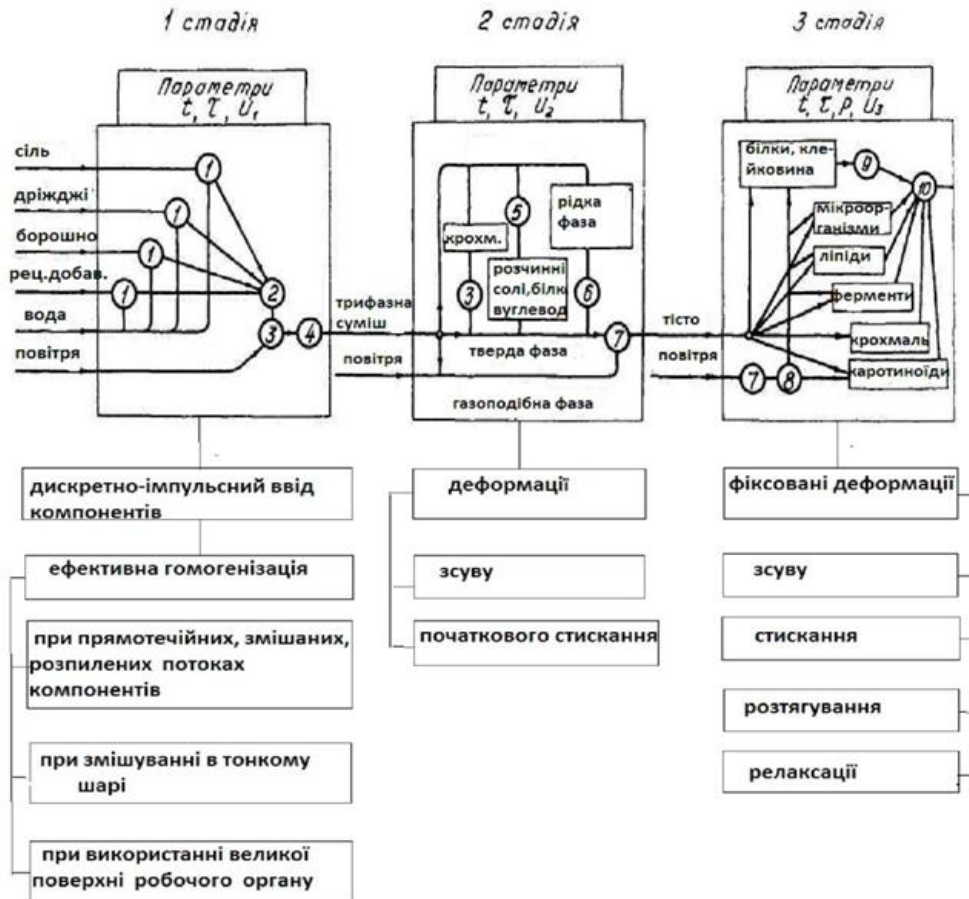


Рис. 1.11. Модель замішування тіста на ДБТМ. Цифрами позначені процеси: 1. зволоження; 2. агрегація; 3. сорбція; 4. диспергування; 5. розчинення; 6. набрякання; 7. оклюзія; 8. окислення; 9. молярні сполучення; 10. структуроутворення.

Запропонована модель доповнює вплив додаткових раціональних параметрів з оптимізацією їх проходження на стадіях замішування і встановлює інтенсивність, тривалість дії та механізм перемішування. Конструктивні особливості роботи дискретного циклу замішування в робочій камері ДБТМ забезпечують здійснення таких операцій:

- перемішування компонентів та переміщення (транспортування) утворюючого тіста місильним барабаном з ділянки «А-релаксації» на ділянку «Б-інтенсивного змішування»;
- заповнення і стиснення його до робочого тиску на ділянці «В-пластифікації»;
- стабілізація тиску поверхнею пасивного вібраційного пристрою;
- створення вібраційного поля;
- розтягування з подачею його на релаксацію (рис. 1.12).

Залежної від кількості компонентів, проходження стадійності замішування вказані операції можуть поєднуватися, змінювати послідовність або частково вилучатися. Здійснення стадійних операцій замішування в робочій камері ДБТМ визначають її робочий процес та узагальнюють вплив істотних функціональних елементів: циліндричного з насічками робочого органу, багатогранної циліндричної робочої камери та пасивного вібраційного пристрою (ПВП). Вони є визначальними факторами при виборі параметрів дискретної безлопатевої тістомісильної машини.

При замішуванні тіста на дискретній безлопатевої тістомісильній машині в умовах дискретної зміни об'єму робочої камери, дотримання симетрії між рухомою і відсутністю симетрії нерухомої поверхні, наявністю сил тертя, адгезії, гравітаційних і відцентрових сил в умовах одновісного розтягування зі встановленими просторовими коливаннями є позитивний фактор, що дозволяє створити оптимальний вплив на зменшення посиленої механічна обробки, при цьому забезпечується висока якість тіста й хліба.

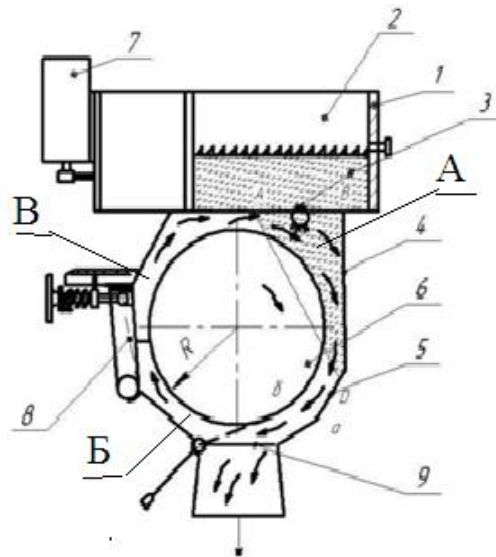


Рис.1.12. Принцип побудови й роботи дискретної безлопатевої тістомісильної машини (ДБТМ): 1. вібратор борошна; 2. ємність для борошна; 3. нагнітальний пристрій рідких компонентів; 4.місильна камера; 5. дільниця зважувального змішування; 6. місильний барабан; 7. електродвигун постійного струму; 8. пасивний вібраційний пристрій (пластифікатор); 9. шибєр вивантаження тіста

Тому створення нового напрямку технології й обладнання дискретного безлопатевого замішування тіста вносить наукові обґрунтування проходження стадійності процесу та розроблення теоретичних основ із визначення поведінки змішуваних компонентів, готовність тіста за його оптимальними реологічними властивостями.

1.4. Класифікація тістомісильних машин з безлопатовим робочим органом

Отримані при кінематичному аналізі результати були використані для розроблення конструктивної класифікації нового покоління тістомісильних машин з безлопатовим робочим органом, що працюють за вібраційно-хвильовим принципом [18,118,127].

Тістомісильні машини з безлопатеvim робочим органом пропонується розрізняти або класифікувати за такими ознаками:

1. Організацією техпроцесу замішування – дискретні та інтегральні.
2. Видом процесу замішування – об'єднання ряду операцій.
3. Класах – замішуючі.
4. Підкласами (технологічні середовища) – в'язкопластичні.
5. Видами робочого органу – циліндричні, конічні, спіралеподібні, поверхні різних форм.
6. Формою робочої камери – пластини, що утворюють просторові поверхні циліндричної форми з хвилястими каналами різних величин.
7. Принципом хвилеутворення – кінематичний і динамічний.
8. Способом хвилеутворення – хвилеутворення локальною деформацією.
9. Видом руху хвиль деформації – поступальні, обертові, просторові, комбіновані.
10. Характером хвиль – одиничні, періодичні, випадкові.
11. Напрямком хвиль – односпрямовані.
12. Способом організації руху хвиль – регульовані періодично, регульовані програмно.
13. Способом віброзбудження робочої камери – кінематичний, динамічний, параметричний, автоколивальний.

Наведена класифікація тістомісильних машин з безлопатеvim робочим органом і багатогранною робочою камерою є конструктивною в тому сенсі, що дозволяє створювати нові типи машин і принципово по-новому організовувати в них протікання процесу замішування. Перший позитивний досвід у створенні таких машин і технологій представлені в наступних розділах.

1.5. Обґрунтування надійності й довговічності

Проблема надійності і довговічності є однією з основних, що визначає ефективність роботи будь-якого виробництва. Для підприємств хлібопекарської галузі вона набуває особливого значення, так як більшість технологічних

процесів відбуваються в рідкій фазі, температурному режимі і значними впливами середовища. Тому забезпечення надійності й довговічності обладнання повинно ґрунтуватися на виконанні певних умов і заходів на етапах проектування, виготовлення та експлуатації. Враховуючи, що при сучасному рівні проектування й конструктивних розрахунках ймовірність раптових відмов досить незначна і вони, в більшості випадків, виявляються і усуваються під час налагодження обладнання. Тому на всіх визначених етапах приділяється особлива увага з раціональним вибором матеріалів і технологічного методу поверхневої обробки деталей.

Конструктивне розроблення деталей і вузлів технологічного обладнання для галузі з метою забезпечення довговічності й зносостійкості повинна проводитись зі урахуванням:

1. Раціональної схеми роботи вузлів, їх конфігурації та розмірів з точки зору впливу на зносостійкість.
2. Раціонального вибору матеріалів для виготовлення деталей з урахуванням впливу на них технологічних середовищ.
3. Доцільного розрахунку й вибору кінематичних і силових параметрів навантаження елементів контактної взаємодії.
4. Вибору ефективних видів мастил і систем змащування вузлів тертя, а також захисту їх від попадання з технологічних середовищ частинок матеріалів.

За основний принцип оцінювання й забезпечення надійності технологічного обладнання хлібопекарської галузі є оцінювання випробувань як усього обладнання, так і окремих його елементів на етапах розроблення, при освоєнні його виробництва та експлуатації. Надійність тістомісильних машин можна оцінити на основі статистики результатів виробництва. З урахуванням того, що можливість оцінювання обмежується недостатніми існуючими статистичними даними. Тому необхідно забезпечити максимальну надійність машини шляхом підвищення якості та ефективності проектування, а також його випробовування й виробництво.

При введенні контролю над виготовленням та покращенням конструкції робочих органів, робочої камери, силових (приводних) вузлів з відповідними характеристиками матеріалів можна звести до мінімуму досліджувані характеристики надійності проектуючого технологічного обладнання. Тому одним із перших найосновніших завдань таких випробувань є встановлення залежностей і обґрунтування раціональних програм керування параметрами надійності машини. Отримана інформація при випробуваннях є джерелом для розрахунку оптимальних значень основних параметрів машини.

В процесі експлуатації всі види технологічного устаткування зазнають певних змін. Ці зміни виникають у результаті дії на робочі органи та вузли машин механічних навантажень, зносу, корозії, дії агресивних середовищ і температур, зміни властивостей робочого тіла. Під впливом вказаних чинників відбувається зношування окремих елементів машин, внаслідок чого порушуються нормальні умови їх роботи, що призводить до прискореного зношування, руйнування окремих деталей і зупинки машини, тобто до відмови.

Основи надійності машини закладаються при розробленні її технічного проекту, робочих креслень і коректуванні документації за результатами промислових випробувань (рис. 1.13). Істотну роль у цьому відіграє і якість виготовлення машини заводом-виробником. Це включає дотримання технології виготовлення окремих деталей, якісне складання вузлів і всієї машини, а також регулювання й випробування в заводських умовах, надійну консервацію і упакування устаткування, комплектацію його необхідною технічною документацією, спеціальним інструментом і комплектом швидкозношуваних запасних частин.

Отже, надійність машини є функцією трьох складових:

- досконалості конструювання і розрахунків;
- якості виготовлення, наладки й регулювання машини на заводі-виробнику;
- умов експлуатації машини на виробництві.

Крім того, надійність регламентується економічним оцінюванням вказаних складових, оскільки рівень надійності безпосередньо пов'язаний з економікою

виробництва. Отже, при оцінюванні надійності машини необхідно порівнювати різні варіанти і виходити з вибору варіанта, що дає максимальний сумарний економічний ефект зі урахуванням виготовлення, вартості експлуатації, ремонтів і тривалості безаварійної експлуатації машини.

Оцінювання надійності машини на стадії розроблення робочого проекту є важливим засобом, що дозволяє контролювати досконалість проекрованої машини і відповісти на запитання яка конструкція придатна для роботи у відповідних виробничих умовах? У цій справі важливим і ефективним засобом є моделювання окремих операцій і процесів у робочих камерах технологічного устаткування. Воно дозволяє дати проектувальникові вихідні дані про навантаження й умови роботи окремих елементів машин, а також технічно грамотно обґрунтувати оптимальні параметри робочого процесу машини.

На стадії проектування важливим, відносно надійності, є підбір матеріалів для окремих деталей, захисних і антикорозійних покриттів деталей, які стикаються з робочим тілом. Найбільш агресивним середовищем у хлібопекарському виробництві є закваски, опари, тісто, соляні і цукрові розчини та ін.

При підборі матеріалів конструктору доводиться вирішувати питання, пов'язані з визначенням економічно доцільного вживання дорогих матеріалів, особливо нержавійних сталей, в тих або інших вузлах машин, зі урахуванням їх терміну експлуатації в цілому. Важливим є відпрацювання конструкції рухомих елементів машин і особливо захисту підшипників від попадання борошна і тіста, що викликає порушення умов змащування, прискорений корозійний і абразивний знос. Заслуговує на особливу увагу вдосконалення конструкції машин для зниження пульсуючих і знакозмінних навантажень.

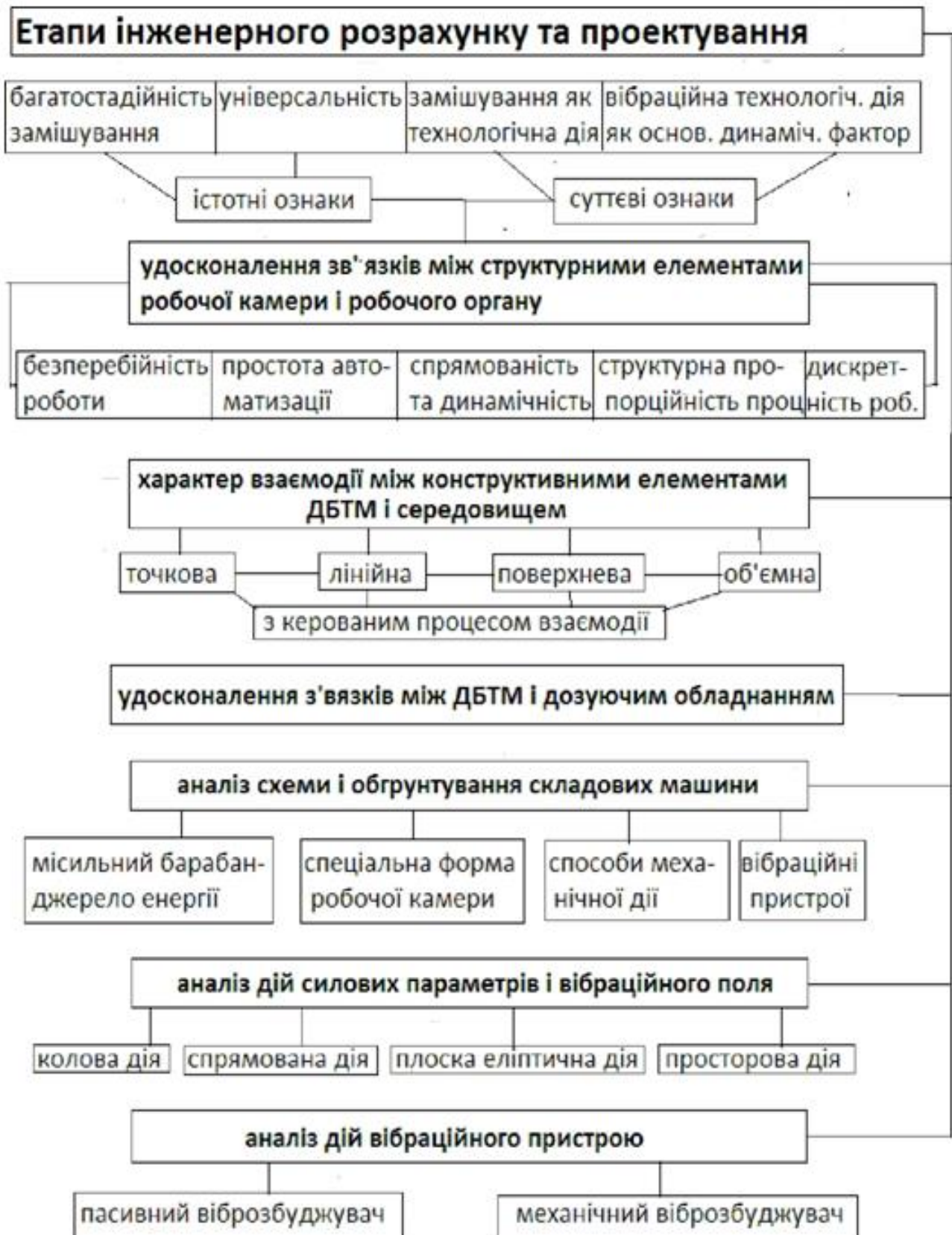


Рис. 1.13. Структурна схема конструктивних рішень та удосконалення надійності безлопатевої машини

Багато видів хлібопекарського устаткування – тістозамішувальні, тістоділильні й тістоформуєчі машини працюють циклічно або з пульсуючим навантаженням. У цьому випадку важливо при підборі електродвигуна користуватися не просто підбором останнього за номінальною потужністю, а робити це з урахуванням моменту інерції ротора двигуна.

Навантаження в робочих камерах технологічного устаткування, а також в окремих деталях можуть коливатися залежно від ступеня завантаження оброблюваної маси в робочу камеру, її рецептури, коливань вологості й вихідних властивостей сировини. Наприклад, при замішуванні тіста з пшеничного борошна з різним умістом клейковини і різною пружністю та розтяжністю навантаження можуть коливатися в межах 30–40% [1]. Отже, фактичні коливання навантажень у цьому випадку носять випадковий характер.

Для отримання розрахункових даних необхідно користуватися опрацьованими статистичними показниками. Звідси випливає, що й самі показники надійності є випадковими величинами і можуть визначатися на основі методів теорії ймовірності і математичної статистики з використанням практичних даних із експлуатації устаткування. Випадкові величини бувають *дискретними* (набувають лише певних значень) і *неперервними* (можуть набувати в певному інтервалі будь-яких значень). Кожному значенню випадкової величини t_i відповідає певна частота появи цього значення в експерименті m_i . При загальному числі спостережень N частота подій визначається як m_i/N .

Ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$ протягом часу напрацювання t визначають з виразу [5,58],

$$P(t) = \int_t^{\infty} f(\tau) d\tau,$$

де $f(\tau)$ - щільність розподілу часу безвідмовної роботи групи випробовуваних машин.

Наближене визначення $P(t)$ здійснюють за формулою $P(t) \approx N(t)/n$

де $N(t)$ - число машин, що залишилися працездатними до кінця напрацювання;
 n - число випробовуваних машин.

При складанні технічних завдань на надійність необхідно враховувати реальні умови технологічного обладнання на хлібо заводах. Показники надійності, що включаються в технічне завдання й технічний проект, забезпечуються ймовірнісними методами розрахунку при проектуванні. Їх розрахунок на стадії технічного проектування має на меті визначення проектної надійності окремих деталей і функціональних вузлів та забезпечення узгодженості показників надійності і роботоспроможності між окремими вузлами. Необхідно виходити з рівності нормативного напрацювання найбільш швидкозношуваних деталей і вузлів у цілому. Якщо таке узгодження не можна забезпечити, тоді необхідне конструктивне зчленування найбільш швидкозношуваних деталей (груп) виконати так, щоб можна було здійснювати його заміну або ремонт без повного розбирання вузла [58].

Ймовірність безвідмовної роботи деталей визначається за допомогою структурних схем надійності вузлів. Структурна схема вузла визначається його конструктивним рішенням і взаємним розташуванням деталей та їх з'єднаннями [6,58].

Задачі оптимізації надійності машин, особливо тістомісильних, що працюють у постійних складних технологічних та конструктивних режимах, при їх проектуванні необхідно узгодити удосконалення зв'язків між структурними елементами машини. Трудність полягає в тому, що на характер взаємодії між конструктивними елементами впливає складність фізичних, хімічних, біологічних та інших процесів, які протікають у робочій камері машини. Тому необхідно постійно проводити пошук методів у детальному вивченні й визначенні дії силових параметрів та можливе застосування вібраційних впливів.

РОЗДІЛ 2

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МЕТОДИКИ ВИКОНАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Аналіз теоретичних положень, що визначають основні напрямки сучасної теорії замішування, що зумовлює вдосконалення інтенсифікації процесу замішування тіста на базі новачійних тістомісильних машин, дозволив розглянути механізм даної теорії. У роботах [4,8,13,17,19,28,35,41,44,78,84,98, 147,148,158] цього питання, досить повно описані механізми інтенсифікації замішування тіста.

При застосуванні інтенсивного замішування тіста необхідно ефективно спрямувати використану енергію так, щоб в умовах оптимальної питомої роботи отримати максимальну консистенцію тіста й одночасно максимальне значення опору деформації розтягування (пружних характеристик). Отримана енергія повинна витрачатися на перемішування компонентів до утворення гомогенної маси, на деформацію стискання, розтягування і зсуву в процесі механічної обробки тіста. Крім того, є непередбачувані затрати енергії не технологічного характеру, тобто подолання робочими органами сил гравітації тіста, опору тіста при вивантаженні через пристрої в робочій камері машини. Одночасно присутні незначні втрати енергії на подолання релаксаційних властивостей тіста, тобто пружного відновлення й релаксації деформації. Ці процеси виявляються за малої інтенсивності замішування.

Крім механічної дії, на структуру тіста впливає й хімічний склад борошна, рецептура тіста, режими перемішування інгредієнтів, технологічна схема й конструкція безлопатевої тістомісильної машини. Якість процесу замішування в даних машинах визначається якістю готової продукції.

Аналізуючи процеси замішування, необхідно спрямовувати його так, щоб мінімальна кількість енергії витрачалася на гомогенізацію тіста, його пересування, піднімання. Це сприятиме раціональному використанню енергії на замішування.

2.1. Формування передумов дослідження безлопатевого замішування тіста

Для роботи нового класу машин дискретної дії, в яких основна частина енергії має витрачатися на замішування, а не на зовнішнє тертя тіста зі стінками робочої камери та робочим органом, є конструктивні та технологічні особливості. Вони полягають у регулюванні процесом утворення тіста. За таких умов інтенсифікація замішування не повинна супроводжуватися значним нагріванням тіста, а створювати достатню аерацію необхідну структуру тіста й інтенсифікувати процес бродіння. Механічна дія на структуру тіста має сприяти активному й доступному керуванню його відповідним властивостям. Такий підхід передбачає правильний розподіл цих дій за інтенсивністю (швидкістю деформації), тривалістю, щоб не порушити структуру, густину, пружно-пластичні властивості тіста. Таким чином, цей процес зумовлює початкову густину й механічні характеристики тіста.

Згідно з теоретичними положеннями конструкція робочого органу в роботі дискретної тістомісильної машини полягає в перетворенні прийнятої механічної енергії обертових елементів на енергію перемішування, транспортування, а також подолання сил опору [88,104,105].

Циклічна дія робочих органів на тісто спонукає до пружного відновлення й релаксації деформацій, що відбуваються одночасно з релаксацією напружень. Якщо тривалість пружного відновлення збігається з циклічністю дій робочих органів (деформівних механічних сил), то на подолання релаксації деформації витрачається відчутна кількість енергії, яка затрачена на замішування.

З літературних джерел [64,67] відомо, що при тихохідному замішуванні тіста відбуваються відновлювальні деформації, відповідно пластична деформація незначна. Зі збільшенням частоти обертання робочих органів, а отже, і швидкості деформації, зменшується опір деформаційним силам (відсутність релаксації) і збільшуються пластичні деформації. Тому ефективність використання енергії при замішуванні тіста залежить не тільки від інтенсивності (за витратами енергії), але й від розподілу затрат на окремі процеси.

Однорідність змішування компонентів визначають за одним із показників рецептури – вологістю, що при оцінюванні структурно-механічних властивостей тіста не дає повної та об'єктивної інформації. Об'єктивну інформацію дають прямі реологічні методи, що добре координуються з технологічними властивостями тіста. Порівняння основних видів деформації при замішуванні (стиснення, розтягування, зсув) показує, що найбільшу інформативність має деформація розтягування. Вона найбільш чутлива до зміни структурно-механічних властивостей тіста і сил міжмолекулярної взаємодії [82].

Поданий механізм удосконалення конструктивних особливостей тістомісильних машин з безлопатеvim робочим органом забезпечує інтенсифікацію процесу тістоутворення, що треба розглядати як комплексну проблему. Успішне розв'язання й вирішення її залежить від сформульованих рекомендацій щодо співвідношення основних геометричних розмірів, взаємопогоджуваного вибору матеріалів робочого органу, корпусу робочої камери та рівня обробки їх поверхонь.

Об'єктивний аналіз кінетичних закономірностей поданих рекомендацій дозволяє оцінити переваги і недоліки інтенсифікації процесу замішування тіста і визначити перспективність подальших досліджень у цьому напрямку. З цих позицій було вибрано об'єкти досліджень і сформульовано такі завдання:

- встановити раціональний технологічний режим приготування тіста на експериментальній моделі дискретної безлопатевої тістомісильної машини;
- встановити особливості дії барабанного місильного органу при інтенсивному замішуванні на якість тіста;
- узагальнити числові значення ефективної в'язкості та граничного напруження зсуву тіста залежно від умов зазору профільного каналу, утвореного між місильним барабаном і корпусом пластифікатора;
- встановити залежність часу бродіння тіста від інтенсивності обертання місильного барабана, швидкості подавання компонентів до «камери відпочинку» і дії вібрації;

- встановити особливості дії конструкції пластифікатора на процес тістоутворення в профільному каналі;
- обґрунтувати методику вимірювання технологічних параметрів замішування тіста;
- обґрунтувати методику вимірювання параметрів тиску на замішуване тісто;
- обґрунтувати методику впливу вібраційної дії дозатора борошна і швидкості витікання рідких компонентів при оптимальних значеннях зазору між місильним барабаном і корпусом пластифікатора на процес інтенсифікації замішування;
- встановити етапи тристадійного процесу замішування при оптимальних значеннях зазору між місильним барабаном і корпусом пластифікатора;
- на основі аналізу досліджень у лабораторних та виробничих умовах встановити раціональні параметри процесу, що дозволить підвищити інтенсивність роботи.

2.2. Характеристика об'єкту й завдання дослідження

У процесі приготування тіста важливим є точність дозування компонентів та якість борошна. Ці вимоги забезпечать раціональні параметри процесу в робочій камері загалом і сприятимуть високій надійності дистанційного керування робочим процесом. Усі заходи, що розглядаються при удосконаленні конструкції тістомісильної машини, базуються на глибокому знанні особливостей процесу із забезпеченням оптимальних параметрів у робочій камері з урахуванням конструкції робочих органів, дія яких повинна відповідати основним вимогам теорії замішування. Ефективність цього підходу впливає на технологічне середовище і передбачає дискретний розподіл енергії в робочому об'ємі, що стає можливим унаслідок створення умов для внутрішнього тертя на зміну макромолекулярної структури тіста.

З огляду процесів замішування тіста найбільш характерним показником роботи тістомісильної машини є рівномірність замісу при оптимальній тривалості та завантаженості робочої камери, що сприяє вирівнюванню концентрації окремих компонентів. Результати процесу дозволяють оцінити відношення рецептурних компонентів і дотримання стабільності управління процесом замішування на дискретній машині. Використовуючи дану методику взаємодії кількох процесів, можна обґрунтувати їх основні закономірності й визначити і встановити раціональні параметри процесу та розміри основних конструктивних елементів машини.

На підставі вивчення взаємодії кількох процесів, характеру фазових перетворень, структури й властивостей тіста встановлено, що при кінцевій перевірці дії безлопатевого робочого органу в робочій камері розробленої моделі, треба докладно обґрунтувати і дослідити ефективність цих дій, серед яких:

- гідродинамічні ефекти, пов'язані з прискореним рухом неперервної фази середовища;
- вібраційний механізм та колективні ефекти в інтенсифікації безлопатевого замішування;
- зміна міжфазової поверхні, що пов'язана з конструкцією безлопатевого місильного органу та геометрією профільного каналу місильної камери;
- дія зсувних напружень у нестационарному потоці утворюваного тіста й момент сил, що сприяє деформації дисперсної системи;
- дія механізму пластифікатора та ефекти інтенсивності зміни консистенції тіста;
- адгезійні механізми, пов'язані з стабільністю технологічного процесу замішування тіста;
- механізм релаксації, що визначає деформаційні властивості тіста;
- дія стискуваності, рецептурних і температурних режимів на реологічні характеристики тіста;

- конструктивні ефекти, що пов'язані з режимами роботи, при яких збільшення питомої роботи супроводжується мінімальними витратами енергії на нагрівання тіста та забезпеченням високої якості хліба.

На основі узагальненого підходу до процесів, що відбуваються в існуючих машинах та новій машині дискретної дії, можливі різні напрямки дослідження утворення тіста. Запропонована схема комплексу досліджень (рис. 2.1) має на меті розкрити можливі фактори оптимізації процесу утворення тіста в робочій камері тістомісильної безлопатевої машини дискретної дії. На основі запропонованої схеми в роботі буде розглянуто шляхи та методи визначення якості замішування тіста та його удосконалення. Значна частина роботи присвячена розкриттю стадійності, математичному моделюванню процесу замішування та розробленню методик визначення якості утворення тіста, що дозволить актуально підійти до нових можливих напрямків при проектуванні та модернізації технологічного обладнання харчової галузі.

2.3. Фізичне моделювання процесу безлопатевого замішування тіста

Ефективна гомогенізація тіста відбувається при перемішуванні зустрічних розпилених струминок борошна і рідких компонентів. Тому необхідно в робочій камері при замішуванні передбачити гомогенізацію в тонкому шарі компонентів при сприянні механічній дії. Водночас необхідно передбачити роль окремих видів деформації при механічній дії на тісто з мінімальним руйнуванням його структури. Це призводить до рівномірного перемішування всіх компонентів з отриманням тіста заданих властивостей. Такий підхід створює оптимальні умови для протікання наступних технологічних процесів (бродіння, розподілу, вистоювання та випікання) [58,85]. Відповідно до особливостей фізико-механічних властивостей тіста процес замішування можна умовно поділити на основні етапи:

1. Замішування борошна з рідкими компонентами до досягнення поверхневого контакту між ними.
2. Утворення в'язко-пластичного тіста.
3. Утворення пружно-пластичного тіста при його інтенсивній обробці.

За такою схемою замішування тіста стадії процесу відбуваються послідовно в міру дозування компонентів і їх просування робочою камерою машини. В даному випадку багатогранна робоча камера уявно ділиться на кілька зон, які відрізняються фізико-механічними властивостями переміщуваних компонентів та характером взаємодії безлопатевого робочого органу.

Враховуючи те, що на перших хвилинах процесу замішування на робочі органи впливає сила ваги і сила внутрішнього тертя компонентів та тертя самих компонентів до робочих органів, бажане конструктивне уникнення цих явищ. Це сприяє зменшенню великих навантажень на робочі органи, оптимальному споживанню енергії, прискоренню процесу.

На наступних стадіях процесу замішування, крім згаданих вище сил, місильні органи мають подолати сили адгезії тістової маси і силу тертя між тістом і ними. Завершальна стадія процесу спрямована на отримання однорідної консистенції тіста. Тому робочі органи витримують великі навантаження, так як вони піднімають тісто по стінках робочої камери машини, просуваючи його. Така схема процесу замішування характерна для всіх типів існуючих тістомісильних машин. Різні фізико-механічні властивості рецептурних компонентів на стадіях початкової гомогенізації й подальшої пластикації структурованого тіста вимагає застосування різних місильних робочих органів і критеріїв оцінювання процесу на цих стадіях.

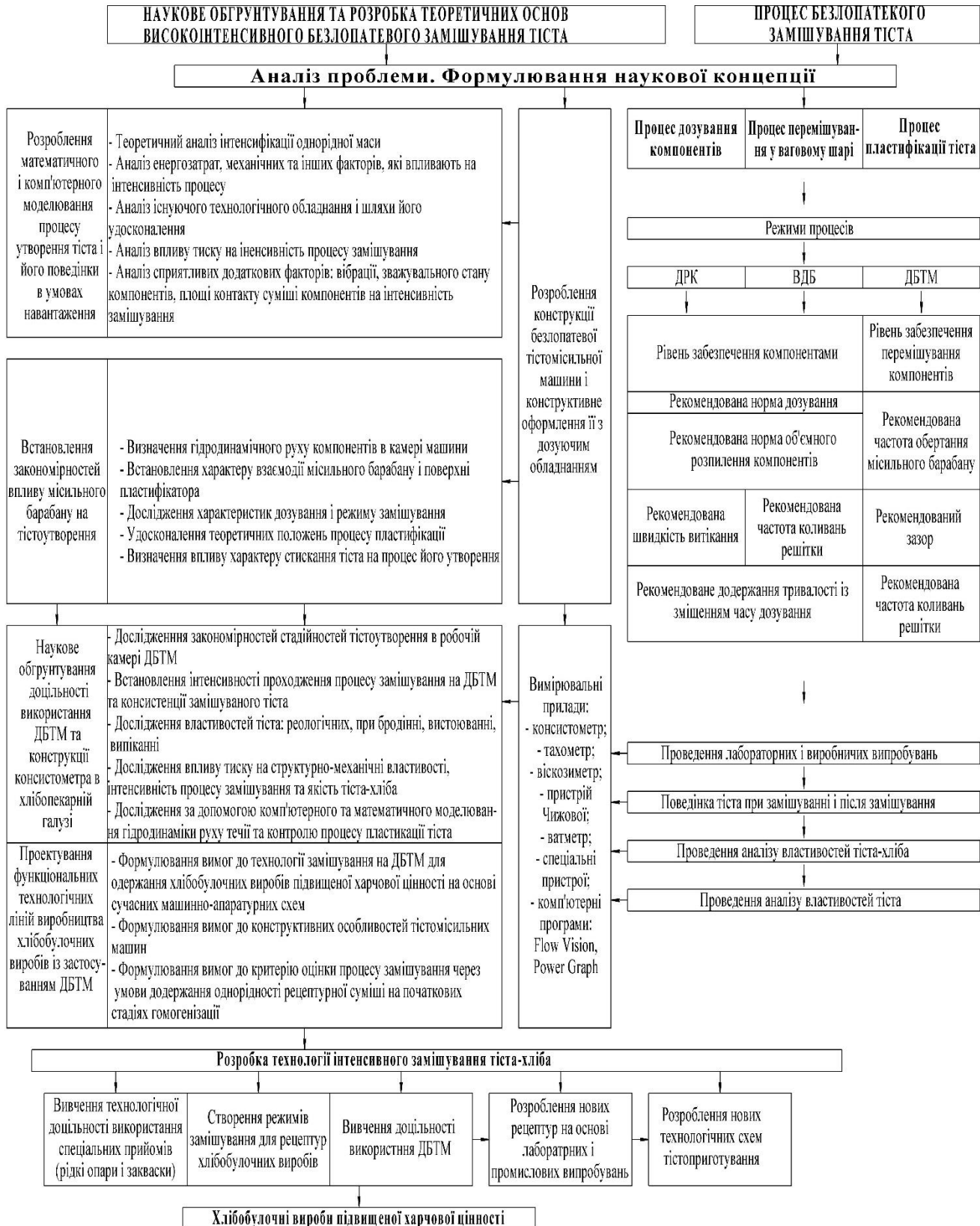


Рис. 2.1. Схема комплексу досліджень

2.3.1. Експериментальна модель безлопатевої тістомісильної машини

Для реалізації поставлених завдань було спроектовано й виготовлено експериментальну модель дискретної безлопатевої тістомісильної машини (ДБТМ, рис. 2.2). Проектування й виготовлення конструкції виконано з урахуванням рекомендацій, викладених у розділі першому та [58,82,100,148]. Принцип роботи тістомісильної машини визначається конструктивними особливостями процесу замішування.

Конструкція місильної камери та місильного органу, утворюють замкнений циліндричний профільний канал прямокутного перерізу з різкими перепадами по товщині каналу. Важливу роль у місильній камері відіграє конструкція пластифікатора. Від його параметрів практично залежить весь процес замішування: тривалість, інтенсивність, якість.

В конструкції машини використано відомі позитивні рішення, тобто місильна камера виконана циліндричною. На виході з неї встановлено додатковий опір, за допомогою якого можна регулювати рівень заповнення робочої камери й інтенсивність останньої стадії замішування – пластифікації. У конструкції машини дуже чітко витримані основні вимоги теорії замішування із забезпеченням оптимальних значень інтенсивності та тривалості впливу на різних стадіях.

Конструкція ДБТМ закритого типу і має вигляд великого віскозиметра з механічним регулятором консистенції тіста, дія якого ґрунтується на зміні пластифікаційної поверхні залежно від вологості тіста, що сприяє зменшенню кількості спожитої енергії.



Рис. 2.2. Загальний вигляд ДБТМ: 1 – дозатор рідких компонентів;
2 – вібродозатор борошна; 3 – місильна машина

Безлопатева тістомісильна машина (рис.2.3) має кільцеву робочу камеру 1, рифлений місильний барабан 2, боковини 3 у вигляді багатогранника, регулятор з стабілізатором консистенції 4, подавач рідких компонентів 5, шибер для розвантаження 6, патрубок для розвантаження тіста 7 та привод (на рис. не вказаний). Машина працює так: спочатку встановлюють регулятор пластифікатора 4 на відповідний показник (залежно від якості борошна й рецептури), перемикають шибер розвантаження 7 в положення «а», вмикається привод місильного барабана і дозаторів через систему автоматичного керування.

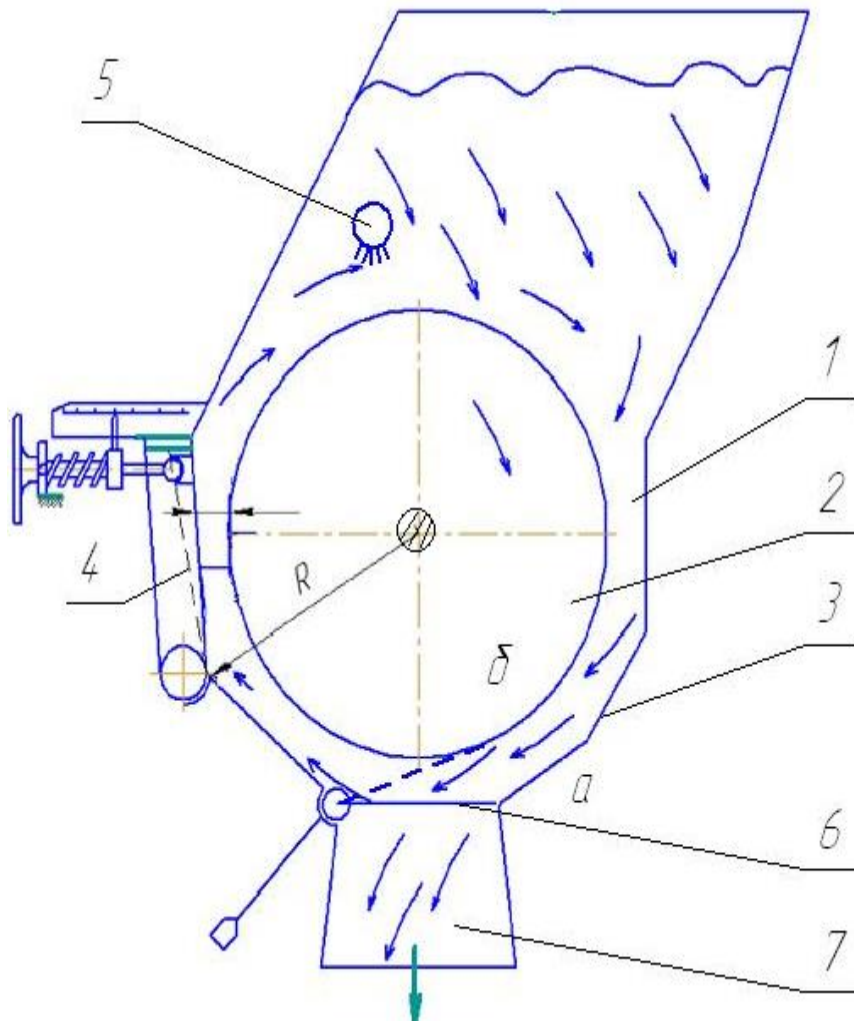


Рис. 2.3. Схема поперечного перерізу машини: 1 – робоча камера; 2 – рифлений місильний барабан; 3 – боковини у вигляді багатогранника; 4 – регулятор з стабілізатором консистенції; 5 – подавач рідких компонентів; 6 – шибер для розвантаження; 7 – патрубок для розвантаження тіста

Замішування виконується внаслідок дії місильного барабана та гальмівних призматичних стінок боковини й регулятора консистенції, що забезпечує інтенсивне перемішування тіста і його раціональне переміщення на поверхні місильного барабана з невеликим зміщенням шарів та з стисненням і розширенням на окремих ділянках робочої камери, що формує структуру. Після закінчення процесу шибер розвантаження встановлюється в положення «б», і робоча камера за кілька секунд (10-12) звільняється від тіста, шибер

перемикається в положення «а», цикл закінчується – для схеми порційного замішування, або повторюється – при неперервному процесі.

Мета й основна відмінність способу роботи дискретного безлопатевого замішування, порівнюючи з традиційним, полягає в тому, що компоненти надходять по черзі – циклічно. В кожен момент часу в камеру надходять лише одна фаза із фаз, які беруть участь у масообміні, при цьому є момент часу одночасного подавання. Час подавання кожної фази – борошна і рідких компонентів може регулюватися в заданих межах за допомогою автоматичного командного приладу, що передає імпульси за спеціально розробленою програмою на вібродозатор борошна і дозатор рідких компонентів. Вони встановлені безпосередньо над робочою камерою машини [130].

Проміжок часу, коли відбувається подавання борошна, називаються вібродозуючим періодом τ_d , а час подавання рідких компонентів – рідинним періодом τ_r . Час вібродозування борошна й рідинного періодів регулюється в заданих межах, що складає в сумі повний час циклу до 90 с.

Суть послідовного методу полягає в тому, що це сприяє в організації контакту фаз в зонах робочої камери та на поверхні місильного барабана у заданому інтервалі часу. Ці інтервали можуть бути розподілені з невеликими проміжками, так як утворення рідинних і борошняних потоків при сприянні великої поверхні місильного барабана створює інтенсивне переміщення обох фаз.

2.3.1.1. Експериментальна установка для досліджень стадійності тістоутворення

Дослідження тістоутворення під час замішування компонентів виконувалися на експериментальній тістомісильній машині дискретної дії. Експериментальна установка (рис. 2.4) для дослідження замішування тіста містить робочу камеру 1, яка являє собою горизонтальну багатогранну ємність із нержавіючої сталі з циліндричним днищем. Кріпиться до станини. По

горизонтальній осі розміщений місильний барабан 2, за допомогою якого проводиться замішування тіста із різною інтенсивністю, що дає змогу отримувати високоякісне та ефективніше перемішування і пластифікацію тіста по всьому об'єму робочої камери.

Над робочою камерою змонтовано вібродозатор борошна ВДБ 3, що має бункер для борошна. Щоб бункер не коливався при дозуванні, на його нижній площині зроблено штопор, який входить у проріз і кільцевий паз основи дозатора. Сам бункер виготовлений із органічного скла, що дозволяє візуально спостерігати за процесом 4. Привод дозатора – це електродвигун постійного струму 5. Дозатор рідких компонентів МДРК 6 являє собою циліндричну посудину, закриту кришкою. Кріпиться він сталевим кільцем до робочої камери машини. За допомогою нахилених трубопроводів, що прикріплені до циліндричної частини і корпусу камери, емульсія зливається на ділянку «релаксації». Обертання місильного барабана передається через варіатор швидкостей 7 за допомогою клинопасової передачі від електродвигуна 8.

Відпрацювання на рідинних середовищах усіх типів робочих органів показало [120,122] їх перспективність і необхідність доопрацювання конструкції так, щоб можна було замінити вплив зусилля адгезії на поверхні робочого органу на зусилля зсуву робочої маси тіста. Це є більш стабільним показником, що дозволить виконати конструкцію багатогранної робочої камери так, щоб процес замішування меншою мірою залежав від властивостей середовища і більш стабільно проходив процес замішування.

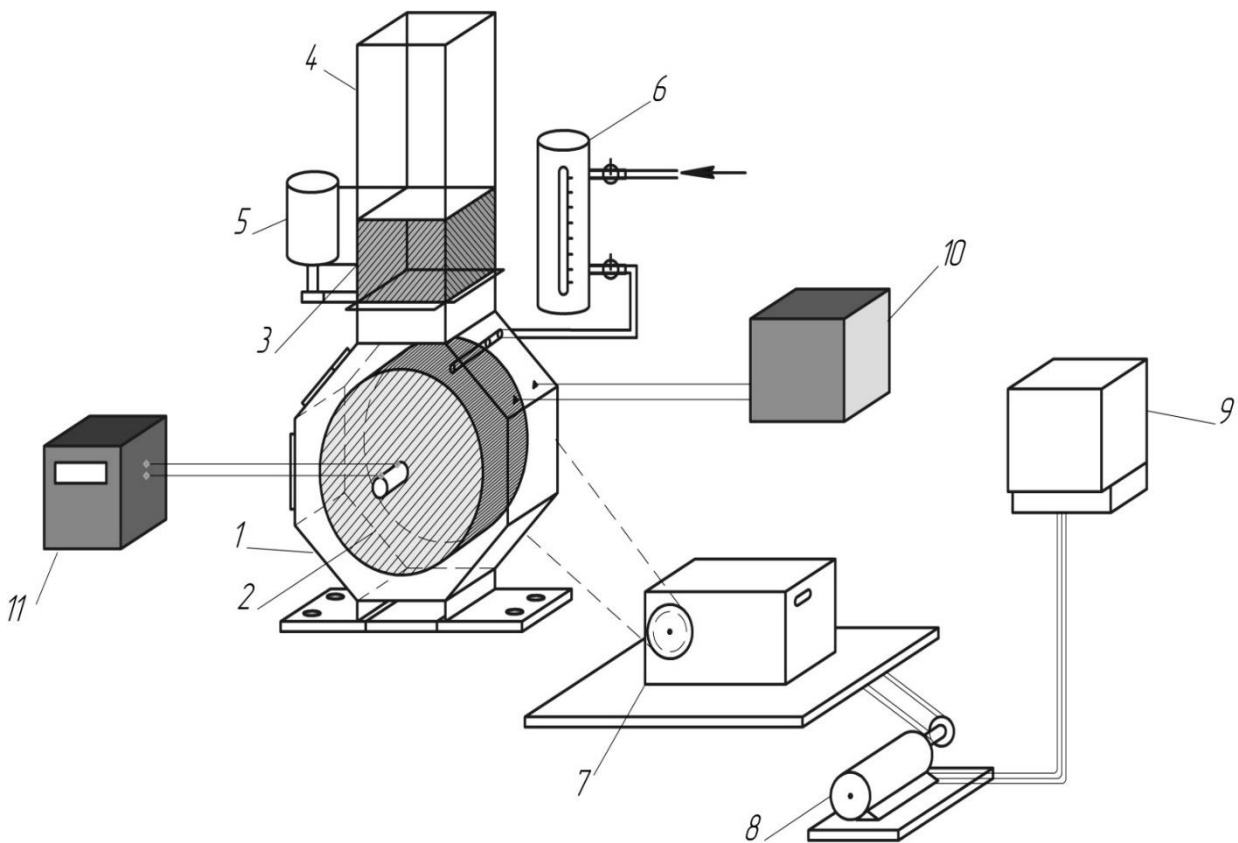


Рис. 2.4. Експериментальний стенд безлопатевої тістомісильної машини ДБТМ: 1 – багатогранна робоча камера; 2. – місильний барабан; 3. – вібро дозатор борошна; 4. – бункер із органічного скла для борошна; 5. – електродвигун постійного струму; 6. – дозатор рідких компонентів; 7. – варіатор швидкостей; 8. – електродвигун 1,2 кВт; 9. – блок обробки сигналів термопар; 10. – лічильник електроенергії; 11. – електронний тахометр.

Пульт керування виконаний у вигляді окремої шафи, де змонтовані засоби з керування установкою, встановлено лічильник електроенергії 10, який визначає навантаження в процесі замішування; електронний самописець 9 фіксує вихідні дані від блока обробки сигналів термопар і переміщення та електронного тахометра 11.

Експериментальна установка для дослідження замішування тіста виготовлена невеликих розмірів, так як наявність великих рушійних мас збільшує інертність системи й вимоги до її рівноваги [4,5]. Крім цього, в

меншому об'ємі легше досягти фазового контакту частинок борошна із дріжджовими клітинами, в результаті чого зменшуються затрати енергії на заміс. У такій експериментальній установці значна частина енергії витрачається на деформацію зсуву, тобто на порушення структури твердої фази і на розвиток фазового контакту.

2.3.1.2. Конструктивні особливості пластифікатора (ПВП) машини

Пластифікатор (рис.2.5, ПВП) складається з поверхні 1, конструкція якої забезпечує легке регулювання відстані між його поверхнею і поверхнею місильного барабана 2. Каркас пластифікатора шарнірно закріплений до корпусу тістомісильної машини 3. До каркаса прикріплено шарнірно-рухомий гвинт 4, який вставляється в пружину 5 і прикріплюється регулятивним пристроєм 6. Регулятивний пристрій – це склянка спеціальної форми, що закручується в рухому гайку 7, шарнірно прикріплену до корпусу тістомісильної машини.

На третій стадії замішування процесові пластикації тіста сприяє пластифікаційна поверхня та місильний барабан. За допомогою місильного барабана шматок тіста рухається формівною поверхнею каналу тістомісильної камери, де стискається і просувається до дільниці пластикації. При цьому створюється початковий тиск у нижній частині місильної камери. Цей тиск поступово зростає й набуває максимального значення в отворі формівного каналу між поверхнею пластифікатора і місильним барабаном. Для стабілізації тиску (підтримання відповідного отвору формівного каналу) служить пружина 5, яка вставлена у шарнірно-рухомий гвинт 4, що служить прямою і регулятивною основою каркаса пластифікатора. Регулювання відбувається за допомогою склянки 6 і гайки 7. Склянка з отвором вставляється у гвинт і надівається на пружину. Гайка фіксує положення нестисненої пружини, а також не дозволяє каркасові змінювати своє положення в профільному каналі. Склянка шарнірно прикріплений до каркаса місильної камери і є опорою для пружини при

її стисканні тістом. Шарнірне кріплення гвинта сприяє плавному рухові поверхні пластифікатора на горизонтальній осі.

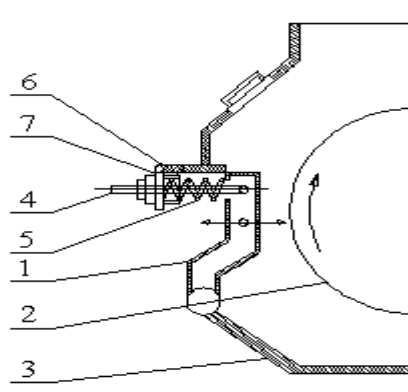


Рис. 2.5. Пластикатор (ПВП): 1 – поверхня пластикатора;
2 – місильний барабан; 3 – корпус машини; 4 – гвинт; 5 – пружина; 6 – склянка
(регулятивний пристрій); 7 – гайка

2.3.2. Пілотна модель вібродозатора борошна

Для вимірювання і підтримання заданої кількості борошна при замішуванні тіста та раціональному механічному впливі на структуру, що забезпечує виконання рецептури та якість виробів, використано вібродозатор борошна [126,130]. Даний дозатор порційної дії забезпечує неперервний вихід борошна і принципово наближається до неперервного дозування (рис. 2.6).



Рис. 2.6. Вібраційний дозатор борошна

Робота дозатора ґрунтується на подаванні борошна із прозорої прямокутної форми бункера віброрешіткою спеціальної форми. Рухома решітка – це прямокутний каркас із нержавійної сталі. Нахил граней рухомої решітки виконаний під кутом 30° . Отвори дозування регулюються за допомогою регулятора, що приводить у рух нижню нерухому решітку. Продуктивність дозування регулюється електродвигуном постійного струму.

Рухома решітка отримує зворотно-поступальний рух від електродвигуна постійного струму. Функціональна схема дозатора наведена на рис. 2.7.

Кут встановлення решітки спрямований до площини руху каркаса, що сприяє рівномірному вибиранню із бункера борошна і його плавному подаванню в робочу камеру машини. При дозуванні борошна відбувається ряд перетворень, характер яких залежить від інтенсивності вібрації. Зі збільшенням інтенсивності вібрацій у параметрах амплітудних значень, не збільшуючи прискорення сил тяжіння, шар борошна отримує псевдотекучість. При цьому зчеплення між частинками борошна зменшується і досягається рівномірне розподілення на всій камері “відпочинку”.

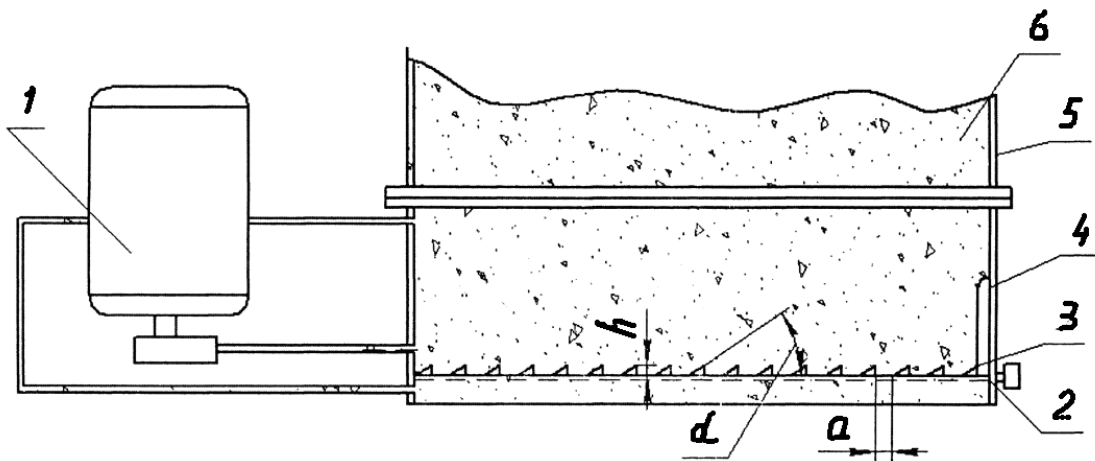


Рис. 2.7. Схема вібродозатора: 1 – електродвигун постійного струму; 2 – регулятивні отвори дозатора; 3 – віброрешітки спеціальної конструкції; 4 – корпус дозатора; 5 – шахта для борошна; 6 – борошно

Для забезпечення можливості регулювання зворотно-поступального руху передбачено тиристорний регулятор, вольтметр і реле часу.

Вібродозатор борошна має такі характеристики:

- потужність двигуна постійного струму – тип ЭП-110/245У3 1Р44;
- діапазон вимірювання кількості обертів вала двигуна – 110V; 3,27A; 4000 r/min;
- діапазон вимірювання часу дозування;
- діапазон зміни кількості борошна в шахті – 3,5-15 кг.

Регулятивні системи дозатора:

- система регулювання частоти обертання вала двигуна;
- система подавання борошна до камери машини;
- система регулювання отворів нерухомої решітки дозатора;
- вимірювання й підтримування потужності двигуна;
- система регулювання тривалості дозування;
- фотографування та освітлення.

2.3.3. Пілотна модель дозатора рідких компонентів

Загальний вигляд дозатора рідких компонентів наведено на рис.2.2 (поз.1).

Тиск стовпа рідких компонентів у циліндричній мірній камері 1 (рис. 2.8) з діаметром 92 мм сприймається еластичною мембраною 2. Це зусилля передається на контактну колонку 3. Контактна колонка одночасно з поплавком 4, що складається з штока й шарнірного притискного клапана 5, перекривають подавання рідких компонентів (емульсії) з живильної місткості до мірника 6.

Наповнення мірної камери дублюється перекриттям подавання електромагнітним вентилем K_1 . Останній блокує відкриття такого ж вивантажувального клапана K_2 . Вивантажувальний клапан K_2 відкриває реле часу через 5-10 сек після увімкнення привода тістомісильної машини, а вимикається через встановлений час, який ми розглянемо нижче. Цей час

залежить від технологічного процесу при замішуванні. Обидва вентиля K_1 і K_2 нормально зачинені в період заповнення мірної камери.

Така послідовність роботи дозатора емульсії забезпечує роботу тістомісильної машини від початку замішування і до вивантаження тіста. Оскільки за проміжок часу 25-30 сек подавання борошна до місильної камери машини процес водопоглинання частинками борошна не закінчився, то подача емульсії триває до певного періоду із постійним напором H , і тиском. З часом тиск зменшується в магістралі дозатора, при цьому консистенція тіста протягом замішування вирівнюється [130].

Процес дозування емульсії до циліндричної мірної камери відбувається при опусканні поплавка до мембрани і розірванні контакту між мембраною і контактною колонкою (електрична схема). У такому положенні вмикається клапан 5, камера наповнюється емульсією, що послідовно зменшується за рахунок перекриття клапана подавання під тиском виштовхувальної сили поплавка.

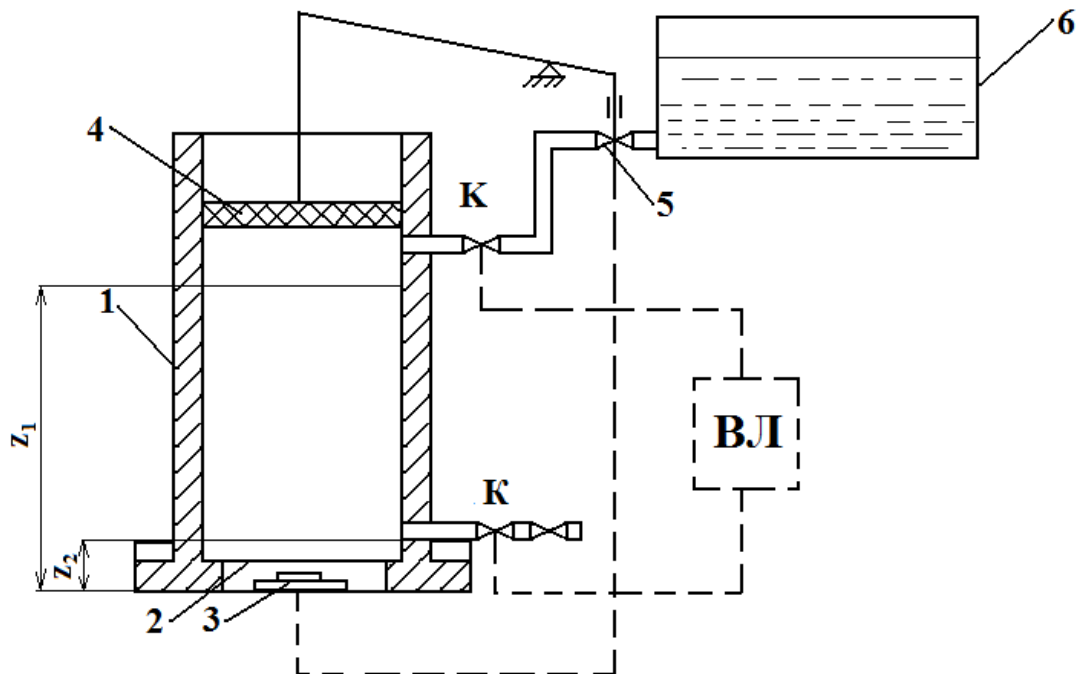


Рис. 2.8. Схема дозатора рідких компонентів: 1 – мірна камера; 2 – еластична мембрана; 3 – контактна колонка; 4 – поплавок; 5 – притискний клапан; 6 – мірник

Ця сила дорівнює вазі емульсії в зануреній частині поплавка, тому принцип дозування емульсії є ваговим із підвищеною точністю за рахунок зменшення подавання емульсії під кінець дозування. Доза емульсії регулюється за рахунок зміни довжини штока або переміщення валика та контактної колонки.

$$G_e = G_g + G_d, \quad (2.1)$$

де G_g – кількість води; G_d – кількість добавок.

$$G_e = 2,5 + 0,27 = 2,77 \text{ кг.}$$

Об'єм емульсії становить

$$V_c = \frac{G_e}{\rho} = \frac{2,77}{1,08} = 2,564 \text{ дм}^3. \quad (2.2)$$

Об'єм одного дм довжини циліндричної мірної камери становить

$$V_{pk_1} = 0,785 * 0,92^2 * 1 = 0,664 \text{ дм}^3 / \text{дм}$$

На технологічний процес потрібна 1 доза, тобто

$$h_g = \frac{G_e}{V_{pk_1}} = \frac{2,77}{0,64} = 4,170 \text{ м.} \quad (2.3)$$

Довжина циліндра на дозу емульсії $G_g = 4 * 0,664 = 2,875 \text{ м}^3$ збільшиться на 1,2 дм.

Тоді повна висота дози в мірному циліндрі $l_{\text{дц}} = 4,17 + 0,4 = 4,57 \text{ дм}$, поплавков при цьому буде занурений на $\Delta l = 4,57 - 1,2 = 3,37 \text{ дм}$, що дозволяє дозування за висотою

$$l_{\text{доз}} = 3,37 \pm 0,8 \text{ дм, тобто } G = 1,696 \div 2,75$$

Дозатор рідких компонентів має такі характеристики:

- діапазон зміни кількості компонентів, що дозуються, 0 - 2,5 кг;
- діапазон зміни швидкості витікання 0-50 м/с;
- загальний об'єм дозатора $0,03 \text{ м}^3$.

Регулятивні системи дозатора:

- вимірювання і регулювання температури компонентів;
- зміна та регулювання швидкості потоку;
- освітлення та фотографування;
- зміна та регулювання об'єму компонентів.

2.4. Методика виконання досліджень

Загальний принцип досліджень процесу інтенсифікації безлопатевого замішування базується на трьох основних процесах, взаємопов'язаних між собою. На кінетику усього процесу замішування буде впливати безлопатевий робочий орган і робоча камера машини, що значною мірою залежать від методики дозування компонентів. Актуальними є також проблеми визначення різних типів деформації та їх взаємозв'язок між прикладеним навантаженням і створеною ним деформацією на процес тістоутворення. Таким чином, потребують досліджень процеси, пов'язані з визначенням раціональних розмірів профільного каналу, частоти обертання безлопатевого (місильний барабан) робочого органу, при яких досягаються якісні органолептичні показники тіста.

Вплив факторів, від яких залежить процес інтенсивного тістоутворення в дискретній безлопатевій тістомісильній машині, розглянуто методом математичного і комп'ютерного моделювання.

Регулюванням процесу важливо встановити, які параметри переважають і які з них можна використати для його автоматичного регулювання. До факторів, від яких залежить інтенсивність тістоутворення в камері ДБТМ, належать: рівень рециркуляції компонентів, тобто величина, що показує, у яких співвідношеннях відбувається дозування компонентів при замішуванні і їхнє відношення (при готуванні житнього і житньо-пшеничного тіста); температура і вологість, рівень стискуваності тіста, частота обертання місильного барабана і рівень контрольованості усього процесу.

Як зазначено вище, принципи роботи ДБТМ спрямовано на об'єднання всіх позитивних характеристик процесу інтенсивного замішування тіста. Характеристики залежать від конструктивних та технологічних принципів отримання тіста.

Дуже цікавий метод обчислення кількості рідини, яку борошно (сорбент) у динамічних умовах може адсорбувати для утворення необхідної консистенції без залишку борошна на дні камери. Цьому процесові сприяє обертовий місильний барабан. Визначення об'ємної швидкості витікання рідких компонентів із мембранного дозатора через пристрій розпилювання дозволяє визначити розміри отворів розпилювача і висоту установки мембранного дозатора, що інтенсифікує даний процес. Основну увагу в усіх дослідках спрямовано на теоретичне й практичне визначення і встановлення впливу потоку компонентів на проходження процесу замішування.

Крім швидкості витікання, необхідно дослідити і якість витікання. Для цього на певній висоті встановлюється дозатор і відчиняється випускний клапан. Перед випускним клапаном встановлено пробковий кран, що дозволяє регулювати час витікання. Швидкість витікання через пристрій визначався за допомогою мірних посудин, що фіксували кількість розчину на перших п'ятих отворах і на останніх чотирьох.

З аналізу консистограми нам відомі межі й тривалість окремих стадій замішування. На відміну від інших процесів замішування тіста, поставлено завдання, щоб процес здійснювався за короткий період часу, а розподілення компонентів повинно утворюватися до того періоду, коли пройде поглинання рідкими компонентами частинок борошна і почнуться утворюватися грудочки. Тому розглянемо першу і другу стадії замішування в наших серіях експериментальних досліджень як принцип отримання тіста з'єднанням борошна і рідких інгредієнтів у тонкому шарі. В основу принципу закладено положення, де компоненти мають змішуватися у ваговому стані під механічною дією місильного барабану в неперервному потоці при сприянні вібрації.

2.5. Методи досліджень

2.5.1. Методи визначення показників

У хлібопекарській промисловості затрати борошна на виготовлення хліба визначаються виходом хліба. Тому науково обґрунтоване нормування цього показника і контроль технологічних втрат на виробництві має велике значення, адже хліб є основним продуктом харчування і об'єктом постачання біологічно-активних речовин, що позитивно впливають на життєдіяльність людського організму.

Методи складання матеріального балансу і способи визначення окремих технологічних втрат треба уточнювати й удосконалювати. Даною методикою проаналізовано й досліджено баланс технологічного виробництва тіста з обґрунтуванням технологічних втрат при його замішуванні, формуванні, випіканні та виході хліба.

У розробленій спрощеній методиці контролю відображено баланс у прибутковій частині, де врахована сировина, а у видатковій – всі технологічні втрати і вихід хліба. Сума всіх компонентів становить вихід хліба, обчислений із рецептури та дослідних даних вологості тіста. Витратна частина балансу містить технологічні втрати, які разом із виходом хліба складають величину, що дорівнює розрахунковій величині хліба. Формула виходу хліба визначалася як різниця між виходом тіста і сумою технологічних втрат [92,143]

$$\partial_{\text{хл}} = \partial_{\text{т}} - (П_{\text{б}} + П_{\text{т}} + П_{\text{б}} + П_{\text{нод}} + П_{\text{уп}} + П_{\text{ус}} + П_{\text{кр}} + П_{\text{ум}} + П_{\text{бр}}),$$

де $\partial_{\text{хл}}$ – вихід хліба; $\partial_{\text{т}}$ – вихід тіста; $П_{\text{б}}$ – втрати борошна в період до замішування; $П_{\text{т}}$ – втрати борошна і тіста в період від замішування напівфабрикату до посадки шматків тіста в піч; $П_{\text{нод}}$ – затрати борошна на розподіл тіста; $П_{\text{уп}}$ – упікання; $П_{\text{ус}}$ – усушка; $П_{\text{ум}}$ – втрати від неточності маси виробів при виробництві штучного хліба; $П_{\text{бр}}$ – втрати від переробки браку.

Вихід тіста зі 100 кг борошна обчислюється за формулою [143]

$$g_T = g_c \frac{(100 - W_c)}{(100 - W_T)},$$

де g_T – вихід тіста зі 100 кг борошна, кг; g_c – сумарна маса сировини, витраченої на приготування тіста з 100 кг борошна, кг; W_c – середньозважена вологість сировини, %; W_T – вологість тіста після замісу, %.

Розмір технологічних втрат визначається шляхом їх зважування. Технологічні витрати при бродінні напівфабрикатів, упіканні, вистоюванні та ін. обчислюються як різниця маси напівфабрикатів до і після відповідної технологічної операції.

Упікання визначаємо за формулою [135]

$$\Pi_{yn} = \frac{g_{yn}(g_T - \Pi_M - \Pi_T - \Pi_6 - \Pi_{разд})}{100}$$

Всі інші втрати і витрати обчислено аналогічно.

Витрати у період бродіння [135]:

$$S_{1,...,5} = \frac{\Delta am}{M \left(1 - \frac{b}{a}\right)},$$

де $S_{1,...,5}$ – витрати при бродінні у напівфабрикатах, що підлягають відновленню на частині напівфабрикату (рідкі дріжджі, закваска і залишок тіста на 100 кг тіста, кг); m – маса готового напівфабрикату для приготування порції тіста, кг; M – маса порції тіста після замісу, кг; Δa – витрати при бродінні, визначені дослідним шляхом на 100 кг напівфабрикатів, кг; a – маса порції напівфабрикату, кг; b – маса частини напівфабрикату, використаної на відтворення напівфабрикату, кг.

Для оцінювання методу контролю кількісних показників технологічного процесу використано методику [143]. При оцінюванні середньої величини ознаки генеральної сукупності за середньою величиною вибірки використано формулу для обчислення граничної помилки. Генеральна сукупність містить

виміри, контроль вологості й кислотності тіста, кількість замісів тіста, досліджуваного за певний проміжок часу. Вибірка – число замісів тіста, що підлягали контролю вологості і кислотності за даний період часу. Для обчислення використано спрощену формулу [58]

$$\mu = \sqrt{\frac{\sigma^2}{n} \left(1 - \frac{n}{N}\right)},$$

де μ – абсолютний розмір різниці між середньою величиною генеральної сукупності і середньою величиною вибірки (гранична помилка); σ – середньоквадратичне відхилення, обчислене для вибіркової сукупності;

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n}},$$

де $\bar{x}$ – середньоарифметична величина ознак; x – величина кожної ознаки; N – число членів генеральної сукупності; n – число членів вибірки (вимірів).

2.5.2. Методи визначення якості сировини і напівфабрикатів

Під час проведення досліджень і виробничих випробувань використовувалися такі види сировини:

– борошно хлібопекарське пшеничне вищого, першого і другого гатунків за ГОСТом 26574-85 і ГСТом 46.004-99 із середніми хлібопекарськими властивостями (табл. 2.1);

– борошно житнє обдирне, показники якості якого відповідали ГОСТом 7045-90;

– сіль кухонна кам'яна ДСТУ 3583-97 (ГОСТ 13830-97) виробництва ДП «Артемсіль» (м. Артемівськ);

– дріжджі хлібопекарські пресовані за ТУ У 15.8 00383320-001 виробництва ЗАТ «Ензим» (м. Львів);

– олія соняшникова рафінована, дезодорована, виморожена марки «П»

ДСТУ4482-2005 (SO22000) ПП «Оліяр» (Львівська область, с. Ставчани).

Визначено органолептично стан поверхні тіста, рівень розрихленості, консистенцію (слабка, сильна, нормальна) і проміс; рівень сухості (волога, суха, липка); колір, смак, запах.

Визначення температури. Температуру напівфабрикатів вимірювали технічним термометром із шкалою від 0 до 100 °С і точністю поділки до 0,5 °С. При вимірюванні температур заглиблювали термометр у тісто на 15 – 20 см тривалістю 2 – 3 хв. Покази вимірювань фіксували відразу після замішування і кінцевий – після бродіння й вистоювання.

Таблиця 2.1

Характеристика партій пшеничного борошна, використаних під час досліджень

№ партії	Гатунок борошна	Характеристики клейковини			Газоутворювальна здатність, см ³ /100 г
		Вміст сирі клейковини, %	Стискання на ИДК-1, од. прил.	Розтяжність, см	
1	вищий	24,0	70	12	1360
2	вищий	25,0	75	15	1504
3	перший	35,0	72	15	1600
4	перший	26,0	70	13	1410
5	перший	27,0	100	19	1300
6	другий	23,0	75	14	1752

Визначення вологості. Відразу після замішування визначали вологість замішаного тіста за методикою [58] – висушуванням у сушильній шафі при температурі 155 °С протягом 15 хв за допомогою приладу ВНІХП-В4.

Кислотність x_m (град) визначали за формулою
Вологість тіста $W(\%)$ визначали за формулою [58,143]

$$w = \frac{(m_1 - m_2) \cdot 100}{m},$$

де m_1, m_2 – маса зразка з пакетом до і після висушування відповідно g ; m – маса тіста, g .

Усі зважування проводили на аналітичних вагах.

Визначення кислотності. Титруюча кислотність є важливим показником, що характеризує процес у заданій фазі готовності тіста. Кислотність тіста визначали для кожного досліду на початковій і кінцевій стадіях. Зважене на аналітичній вазі в чашці тісто (5г) розчиняли у фарфоровій ступці з 50 мл дистильованої води і 3–5 краплями 1 % спиртового розчину фенолфталеїну. Суміш титрували 0,1% розчином гідроксиду натрію до появи рожевого кольору, що утримувався 1 хв [143].

$$X_m = 2 \cdot \alpha \cdot K,$$

де α – кількість розчину гідроксиду натрію, мл; K – поправний коефіцієнт до титру лугу.

Активну кислотність визначали за допомогою рН-метрів марок рН-121, рН-261.

Визначення піднімальної сили тіста. Піднімальну силу тіста визначали за методом спливання кульки тіста, замішаного із напівфабрикату за рецептурою, опускаючи у воду тісто.

Шматок замішаного тіста ділимо на дві частини, обкатуємо між долонями до гладкої поверхні без тріщин. Кульки одночасно опускаємо в мірник із водою 200 – 250 мл при температурі 32°C. Мірник розміщуємо в термостаті з температурою 30 – 32°C. Результат аналізу визначається як середнє арифметичне двох паралельних визначень і різниця в часі спливання на поверхню повинна бути понад 2хв [143].

Визначення показників фізичних властивостей тіста. В'язко-пластичні властивості тіста визначали за допомогою ротаційного віскозиметра „Реотест-2” із двома коаксіальними циліндрами, використовуючи циліндр S2 та повний діапазон швидкостей обертання ротора в режимі aI.

Напруження зсуву τ (Па) визначали за формулою [58,143]

$$\tau = z \cdot \alpha,$$

де α – показники на шкалі приладу; z – постійна, значення якої залежить від циліндрів, що застосовуються.

Динамічну в'язкість η (Па · с) визначали за формулою

$$\eta = 0,1 \cdot (\tau / \gamma).$$

Для визначення залежностей швидкості зсуву від напруження зсуву і динамічного напруження зсуву, використано закон течії в'язко-пластичного середовища Шведова, метод Бранопольської. Газоутримувальну здатність оцінювали непрямим методом за зміною питомого об'єму тіста під час бродіння. Для цього 50 г тіста вміщували в циліндр об'ємом 250 см³ і витримували в термостаті впродовж бродіння до моменту опадання тіста. Біохімічні та мікробіологічні процеси визначали за інтенсивністю газоутворення – на приладі АГ-1М.

2.6. Методи дослідження якості хліба

Показники якості хліба визначали за органолептичними і фізично-хімічними показниками. За органолептичними показниками визначали форму хліба, колір і стан його скоринки, смак, запах, товщину скоринки, стан м'якушки за промішуванням, пористістю, еластичністю, наявністю або відсутністю хрусту від мінеральних домішок [58,143].

Фізико-хімічні показники якості хліба визначали через 3 год після випікання в лабораторних та виробничих умовах за стандартними методами.

Визначення масової частки вологи. Масова частки вологи є важливим фізико-хімічним показником якості хліба, передбаченим стандартом ГОСТ 21094-75. Приготовлені взірці м'якушки хліба подроби́ли ножом і перемішали. В попередньо зважені бюкси взято дві наважки по 5 г. Зважували на технічних вагах з точністю до 0,01г. Висушували в електричній шафі при температурі 140-145°C. Після висушування й вистигання знову зважували. За різницею між масою до і після висушування визначали масову частку вологи.

Визначення кислотності хліба. Кислотність хліба свідчить про правильність технологічного процесу і його смакові якості. Тому кислотність визначалася стандартним методом за ГОСТ 5670-51 [58,143].

Визначення пористості хліба. Визначали об'єм вирізаного шматка м'якушки і об'єм непористої маси м'якушки після пресування. Пористість визначали за формулою $P = (V - V_1) / V \cdot 100$ (метод Якобі) за ГОСТ 5669-51.

Рівень свіжості хліба оцінювали за зміною структурно-механічних властивостей м'якушки на приладі "Структурометр". Шматок хліба з центральної частини хліба товщиною 2 см піддавали стисненню в трьох точках насадкою під дією навантаження 5 Н з коефіцієнтом стиснення 9.

2.7. Спеціальні методи дослідження

Частина обґрунтованих досліджень виконана за відомою методикою. Інші з метою уникнення великої кількості обчислень, – за допомогою спеціальних пристроїв і комп'ютерних програм.

Науково-обґрунтована технологія процесу замішування та отримання тіста з відповідними властивостями передбачає контроль характеристик тістоутворення. Вивчення й використання реологічних властивостей тіста викликає великий теоретичний інтерес і має відповідне практичне значення.

Ми запропонували та сконструювали пристрої, за допомогою яких можна досліджувати визначення часу кінцевого вистоювання опори, тіста і його стабільності в кінці вистоювання за зміною його об'єму, реологічні властивості [118,146,148]. Принципові схеми пристрів наведено на рис. 2.9, 2.10, 2.11.

Пристрій для випробовування тіста на розтяг призначений для визначення структурно-механічних властивостей тіста. Тобто дозволяє оцінити розтяжність, міцність, схильність до пружних і пластичних деформацій.

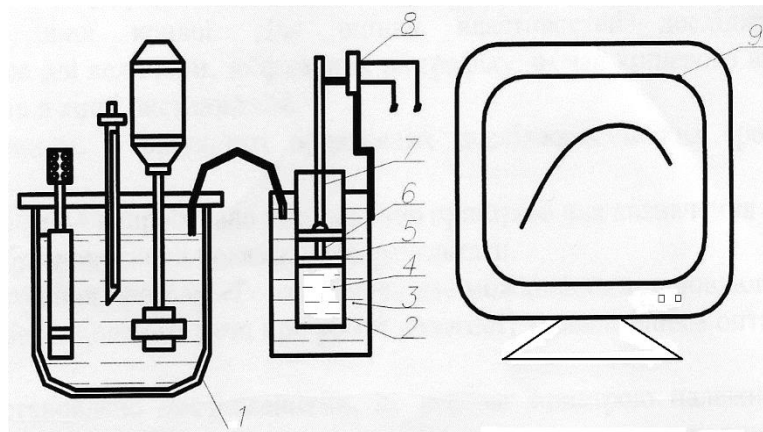


Рис. 2.9. Пристрій для дослідження інтенсивності бродіння: 1 – термостат; 2 – мідний циліндр; 3 – водяна сорочка; 4 – тісто; 5 – поршень; 6 – штанга; 7 – шток; 8 – реохорд; 9 – комп'ютер

Пристрій (рис. 2.10) містить нерухомий і рухомі захоплювачі для випробовуваного зразка, кожен з яких виконаний у вигляді пружинних затискачів 1, 2. Рухомі захоплювачі закріплені на металевій рамі 3, встановленій на підставці 4 за допомогою роликів, що крутяться, 5. Пристосування для визначення величини переміщення виконано у вигляді шкали з поділками 6. Випробовуваний зразок підтримується за допомогою послідовно закріплених на основі приладу роликів 7. Навантажувальний механізм складається з стійки 8, на якій закріплені напрямні кронштейни 9 для натягування нитки 10 вантажем 11. Вони сполучені з рухомим захоплювачем.

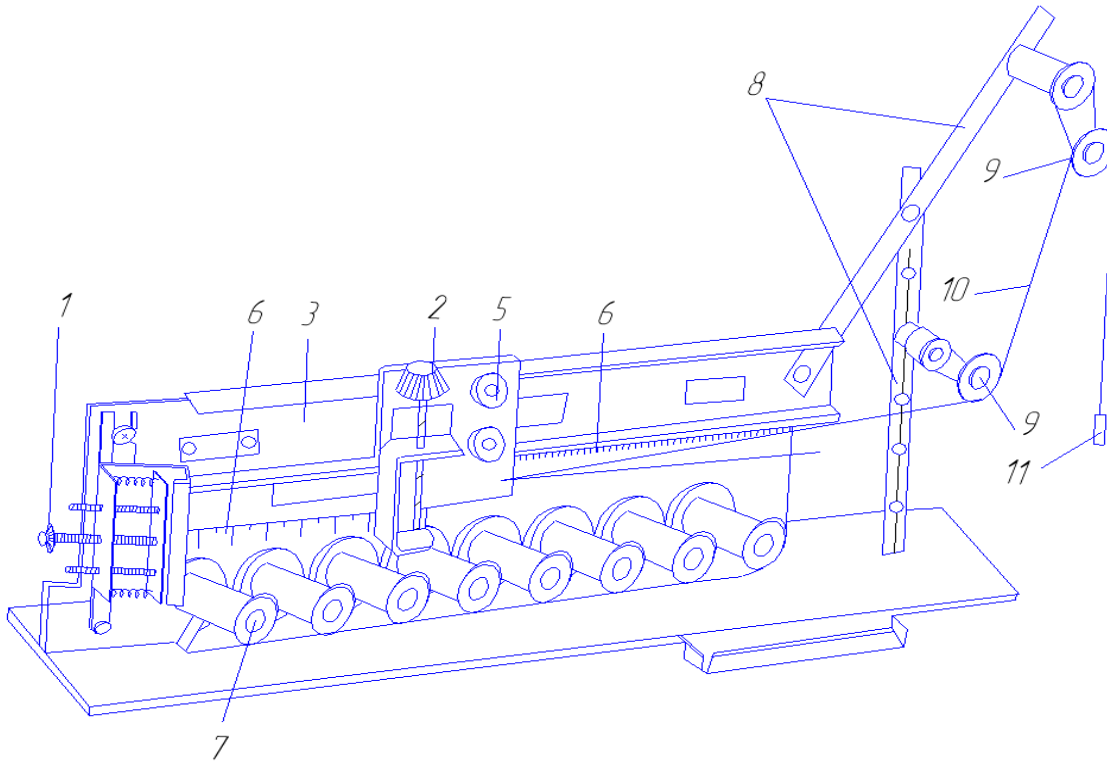


Рис. 2.10. Пристрій для випробовування тіста: 1,2 – пружинні затискачі; 3 – металева рама; 4 – підставка; 5 – ролик; 6 – шкала; 7 – підтримуючі ролики; 8 – стійка; 9 – напрямні кронштейни; 10 – нитка; 11 – вантаж

Пристрій ПЛС для визначення реологічних властивостей замішаного та тіста, що бродить. Можна визначати оптимальні параметри приготування хлібного тіста. Схема приладу наведена на рис. 2.11.

Прилад складається з корпусу, електромагнітного клапана, записувального пристрою. Циліндричний корпус із нержавійної сталі 1 спирається на опорний диск з органічного скла. На осі циліндра розміщений напрямний шток 9, у центрі якого розміщено пуансон 5 у напрямному циліндрі 8. Пуансон певної ваги рухається на вертикальній осі напрямного штока і має два положення: 1 – коли нижня площадка пуансона перебуває в одній площині з опорним диском, і 2 – в положенні вільного ковзання на напрямній під дією сил пружини 2. Стрілка за певний час поступово відхиляється й обліковує динаміку стану пружних властивостей тіста замішаного або яке вже певний час бродило.

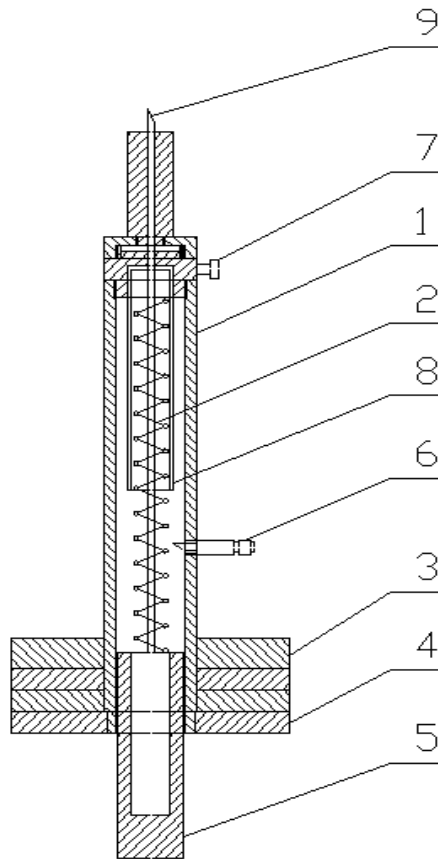


Рис. 2.11. Схема пристрою ПЛС-1: 1 – корпус; 2 – пружина пуансона; 3 – допоміжні диски; 4 – опорний нижній диск; 5 – пуансон; 6 – нижній фіксатор; 7 – верхній регулятор; 8 – напрямний циліндр; 9 – напрямний шток

Програмне забезпечення. На стадії пластифікації тісто характеризується динамічною в'язкістю, що зумовлює високу точність вимірювань. Правильний вибір поверхні пластифікатора, контрольно-вимірювальної та записувальної апаратури має враховувати малозначущі фактори та зовнішні перешкоди.

Для забезпечення високої якості випробувань при визначенні динамічного тиску на вході формівного каналу перед поверхнею пластифікатора, а також регулювання консистенції тіста при замішуванні на новій тістомісильній машині запропоновано експериментальний стенд з інтегральною програмою «Power Graph» (рис. 2.12) [128].

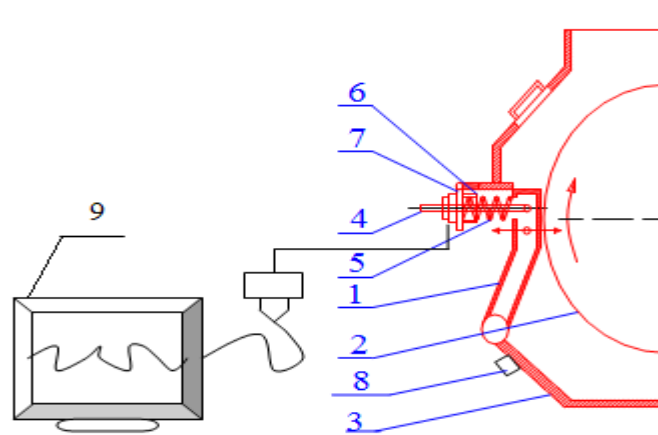


Рис. 2.12. Пластикатор: 1 – каркас; 2 – барабан; 3 – корпус машини; 4 – шарнірно-рухомий гвинт; 5 – пружина; 6 – регуляторний пристрій; 7 – гайка; 8 – термодавач; 9 – монітор

Експериментальний стенд містить каркас 1, конструкція якого забезпечує легке регулювання відстані між його поверхнею і поверхнею місильного барабана 2. Каркас пластифікатора шарнірно прикріплений до корпусу тістомісильної машини 3. До каркаса прикріплено шарнірно-рухомий гвинт 4, що вставляється в пружину 5 і прикріплюється регулятивним пристроєм 6. Регулятивний пристрій – це місткість спеціальної форми, що закручується в рухому гайку 7, шарнірно прикріплену до корпусу тістомісильної машини.

Силу тиску на поверхні пластифікатора визначили шляхом реєстрації її зміщення за допомогою комп'ютера з інтегрованою програмою «Power Graph» як персонального самописця. Сигнал подавався від умонтованого резистора як давачів 2 і реєструвався через пристрій вводу з ілюстрацією на моніторі. Для визначення температури тіста вмонтований термодавач 8, сигнал від якого фіксував комп'ютер при дослідженні теплового режиму. Це дозволило відмовитися від тензодавачів, тензопідсилювачів, струмозмінних пристосувань та осцилографа. Можливість отримати безпосередньо на дисплеї комп'ютера та аналізувати результати досліджень значно підвищила якість і достовірність випробувань.

У зоні пластифікатора утворююче тісто передає відповідне зусилля його поверхні 1 і стискає або послаблює пружину 5 регулятора до положення рівноваги. Якщо консистенція тіста слабне, то пружина вирівнюється і звужує канал, доводячи опір в ньому до встановленого регулятором 4 і подає сигнал на реле часу. За сигналом встановлюється оптимальна тривалість замішування відповідно з рецептурою й технологічним режимом. Сам каркас пластифікатора виготовлений з нержавійної сталі, має форму конфігурації днища тістомісильної камери. Один кінець шарнірно прикріплений до корпусу машини, інший вільно рухається в межах, установлених регулятором.

Загальна характеристика програми «Power Graph». Програма призначена для реєстрації, обробки і зберігання аналогових сигналів, записаних за допомогою аналого-цифрових перетворювачів (АЦП), і дозволяє використовувати персональний комп'ютер як звичайний стрічковий самописець. Основні функції програми: реєстрація аналогових сигналів у реальному масштабі часу, графічне відтворення і зберігання даних, первинний аналіз і опрацювання записаних даних, імпорт і експорт даних. Програму та довідник з її використання можна завантажити на сайті www.powergraph.ru (безкоштовна робоча версія 2.1).

Мінімальні потреби при установці програми: операційна система – Windows (98, ME, 2000, XP, Vista); операційна пам'ять – 32 Мб; вільного місця на жорсткому диску – 50 Мб. Для записування сигналів у програмі «Power Graph» необхідно заздалегідь вибрати відповідний драйвер пристрою АЦП (наприклад Joystick).

Для аналізу даних у програмі «PowerGraph» використовується набір інструментів, реалізованих у вигляді додаткових вікон програми, що надають специфічних функцій аналізу даних (математичні розрахунки, побудова графіків та ін.): Zoom Window – дозволяє оглядати записані дані в збільшеному масштабі, а також визначати значення амплітуди і часу окремих точок кожного каналу; Data Pad – містить велику кількість інформаційних і статистичних функцій, що дозволяють отримати докладну інформацію про характеристики

блока, області виділення і даних будь-якого каналу; XY Window – дозволяє будувати графік залежності амплітуди одного каналу від іншого і аналізувати кореляцію сигналів у цих каналах, а також надає такі параметри: лінійний коефіцієнт кореляції, середнє значення, дисперсію і стандартне відхилення для кожного з каналів.

Таким чином, застосування програми «Power Graph» дозволяє ефективно і якісно реєструвати, зберігати й оцінювати результати експериментальних випробувань, опрацьовувати та експортувати їх.

2.8. Оцінювання похибок вимірювання

Для визначення достовірності результатів вимірювань та обчислень виконано оцінювання похибок. Насамперед виконували оцінювання середнього значення вибірки з n випадкових чисел за рівнянням [102,140], що є справедливим для нормального розподілу випадкових чисел з невідомими середніми

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - X_0) + X_0, \quad (2.4)$$

і дисперсію вибірки

$$S_{X_i}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2. \quad (2.5)$$

Визначення середньоквадратичної похибки окремого значення

$$S_{X_i} = \sqrt{S_{X_i}^2}. \quad (2.6)$$

і середнє значення вибірки:

$$S_{\bar{X}} = \frac{S_{X_i}}{\sqrt{n}}. \quad (2.7)$$

Надійність результатів перевіряли за критерієм Стюдента t_α за вибраної ймовірності $P=0,95$ (використовують переважно для технологічних процесів). Абсолютну похибку визначали за рівнянням

$$\varepsilon_{x_i} = t_{\alpha} S_{x_i}. \quad (2.8)$$

Відповідно інтервальні значення знаходили згідно з рівнянням

$$X_i = \bar{X} \pm \varepsilon_{x_i}. \quad (2.9)$$

Для інтервальних значень визначали також відносну похибку окремого вимірювання:

$$\Delta_{x_i} = \frac{\varepsilon_{x_i}}{\bar{X}} \cdot 100\%. \quad (2.10)$$

Для визначення вищеописаних похибок була складена програма у Delphi.

Перевірка на однорідність виконується для результатів двох серій спостережень зі використанням критерію Стюдента, а для більшого числа серій спостережень (вимірювань) – критерію Р. Фішера.

Відповідно до критерію Стюдента дві серії ($L=2$) з числом результатів спостережень n_1 і n_2 визнаються однорідними, якщо виконується нерівність

$$\frac{|\bar{X}_1 - \bar{X}_2|}{\sqrt{(n_1 - 1)\sigma_1^2 + (n_2 - 1)\sigma_2^2}} \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}} \leq t_p, \quad (2.11)$$

де $\bar{X}_1, \bar{X}_2$ – середні арифметичні результатів спостережень першої і другої серій відповідно; σ_1^2, σ_2^2 – незміщені оцінки дисперсій результатів спостережень першої і другої серій; t_p – коефіцієнт Стюдента, значення якого при числі степенів вільності $k_s = n_1 + n_2 - 2$, задаючись відповідною довірчою ймовірністю Р або рівнем значущості $\alpha = 1 - P$.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ ДЕФОРМУВАННЯ ТІСТА В УМОВАХ СИЛОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ ПІД ЧАС ЗАМІШУВАННЯ

3.1. Об'єкти фізичних досліджень і математичного моделювання процесу замішування

При приготуванні високоякісного тіста слід забезпечити оптимальну інтенсивність, тривалість і температуру при раціональній частоті обертання місильного органу. Проаналізовано, що тривалість замішування при однакових питомих витратах енергії на заміс структури тіста буде різною. Це відбувається внаслідок різної динамічної рівноваги між процесами руйнування й відновлення структури полімерів тіста. Тому конструктивні особливості тістомісильних машин, що проектуються або модернізуються, повинні при витраті мінімальної кількості енергії забезпечити бажаний технологічний ефект [58,89,91].

При виконанні теоретичних і експериментальних досліджень робочих процесів при замішуванні одним зі головних об'єктів є поведінка і стан пшеничного і житньо-пшеничного тіста, що є складною гетерогенною колоїдно-дисперсною системою. Тісто характеризується як пружно-в'язко-пластичний матеріал з притаманним йому невеликим граничним напруженням зсуву та залежністю в'язкості від швидкості деформації. Математично поведінка такого матеріалу досить точно описується степеневим законом Гершеля-Балклі [3,23,25,34,63,79]. Властивості пружності, в'язкості, пластичності певною мірою визначають різні стадії технологічного процесу замішування.

Складові тіста можна об'єднати в три групи, що утворюють відповідні фази: рідку, тверду й газову. Рідкою фазою є вода, що може мати різні форми зв'язку з рештою інгредієнтів. Її кількість, необхідна для замішування, визначається рецептурним складом виробів і коригується з урахуванням гідрофільних властивостей компонентів борошна. Загалом залежно від виду й

сортів виробів, способів технологічної обробки вологість борошняного тіста може досягати значної величини. Для тіста, що розглядається, цей показник становить 45 %. При цьому певна частина води, не зв'язана набухлими білками, зернами крохмалю або частками оболонки зерна, залишається вільною й утримується у тісті слабкими зв'язками капілярного змочування та не змінює своїх фізико-хімічних властивостей. Однак, незважаючи на слабку енергію зв'язку такої вологи, видалення її з тіста механічним шляхом неможливе. Тому при замішуванні тісто розглядається як двофазна система, де однією фазою є твердо-рідинна, іншою – газова. Аналогічний метод розгляду фаз тіста використано в роботі [113].

Газова фаза тіста формується як за рахунок повітря, що захоплюється борошном при його вібродозуванні та частково з рідкими компонентами, а також під час замішування. Завдяки його захоплюванню й утримуванню та за рахунок газоподібних продуктів (переважно вуглекислого газу) при спиртовому бродінні утворюється пориста структура виробу.

Аналіз літературних джерел показав [61,82,102,133,134], що збільшення об'єму пухирців пов'язано з дифузією CO₂ через стінку пор. Процес відбувається в напрямі від більшого надлишкового тиску, характерного для пухирців малих розмірів, до меншого тиску. В результаті таких дій відбувається вирівнювання структури.

Для того, щоб пухирець почав збільшуватися у розмірах, різниця тисків всередині та ззовні нього має перевищувати ефекти поверхневої напруги та сил в'язкості [82], тобто

$$\Delta P > \frac{2\sigma}{R_{кр}} + 4\eta \frac{R}{R_{кр}},$$

де ΔP – різниця тисків у середині та ззовні пухирця, Па; σ – поверхнева напруга, Н/м; $R_{кр}$ – критичний радіус пухирця, м; η – динамічна в'язкість матеріалу; $R = dR / dt$ - швидкість зміни радіуса пухирця з часом, м/с.

Подальше збільшення кількості та об'єму газових пухирців викликає зменшення товщини їх стінок аж до руйнування, злиття пор і видалення газу з поверхні тіста. Це можливо за наявності в тісті сусідніх пор з різними розмірами і тиском газу. Саме процеси руйнування й утворення нових пухирців призводять до нерівномірного розподілу газових включень у тісті та є причиною його реонестабільності [34].

Конструкція профільного каналу робочої камери і поверхня пластифікатора мають вирішальне значення в процесі пластикації тіста для отримання якісних готових виробів. Важливу роль при дослідженні процесу замішування відіграє дозування компонентів. Вплив довжини, відношення змінної площі камери стиснення до площі профільного каналу на стан процесу та явище витікання тіста дозволяють запропонувати найраціональнішу форму робочої камери й поверхні пластикатора. При такому конструктивному підході вдасться уникнути застійних зон і забезпечити більш рівномірну швидкість руху тіста.

Технологічні режими проходження всіх стадій замішування та роль пасивного вібраційного пристрою у визначенні якості утворення тіста, вплив нагнітання і стискання тіста на якість тіста й хліба є основним об'єктом досліджень. Літературні дані в найкращому випадку аналізують лише загальне уявлення про характер цього впливу. Числові значення, як правило, подані для визначеної рецептури й конкретного обладнання, спричиняють значні похибки при перенесенні їх на інші випадки. Наприклад, недотримання наступності й тривалості дозування компонентів призведе до перевитрати енергії, що не дозволить забезпечити потрібну раціональну швидкість тістоутворення.

Таким чином, процеси, що пов'язані зі впливом конструктивних параметрів машини на кінетику тістоутворення при пластикації тіста, потребують нових ґрунтовних досліджень. Актуальними є і проблеми визначення оптимальної частоти коливання вібродозатора борошна, частоти обертання місильного барабана, геометрії та профілю щілини, швидкості

витікання рідких компонентів на безлопатевій дискретній тістомісильній машині (БДТМ). Саме від цих факторів залежить якість замішування тіста.

Загальний принцип дослідження реологічних характеристик тіста полягає у визначенні взаємозв'язку між прикладеними навантаженнями та деформаціями тіста. Залежно від видів навантаження, якими можуть бути крутний і згинальний моменти, розтягувальне і стискувальне зусилля, тісто зазнаватиме різних типів деформацій [67,128].

3.2. Фактори впливу на структуру тіста

Кінцевою метою замішування є отримання напівфабрикатів або готових виробів з найліпшими показниками якості. При цьому треба забезпечити ефективність технологічного процесу і досягти заданої продуктивності. На рис. 3.1 наведено параметри процесу замішування. Вони є зв'язком між факторами і параметрами процесу, що відображають характеристики готової продукції.

На системні змінні замішування й характеристики тіста можуть впливати кількісний і якісний склад інгредієнтів тіста. Вони залежать від специфіки дії вібродозатора борошна, конфігурації місильного барабана, робочої камери і пластифікатора. При цьому велику роль відіграє температура, тривалість і, головне, тиск. Змінюючи вказані фактори, можна визначити раціональні умови проведення замішування для отримання різних видів тіста. Пластифікація тіста при певних раціональних режимах призводить до поліпшення якості виробів і економії матеріальних ресурсів. Тому не дивно, що саме цьому питанню приділяється значна увага науковців при створенні нових технологій і тістомісильних машин.

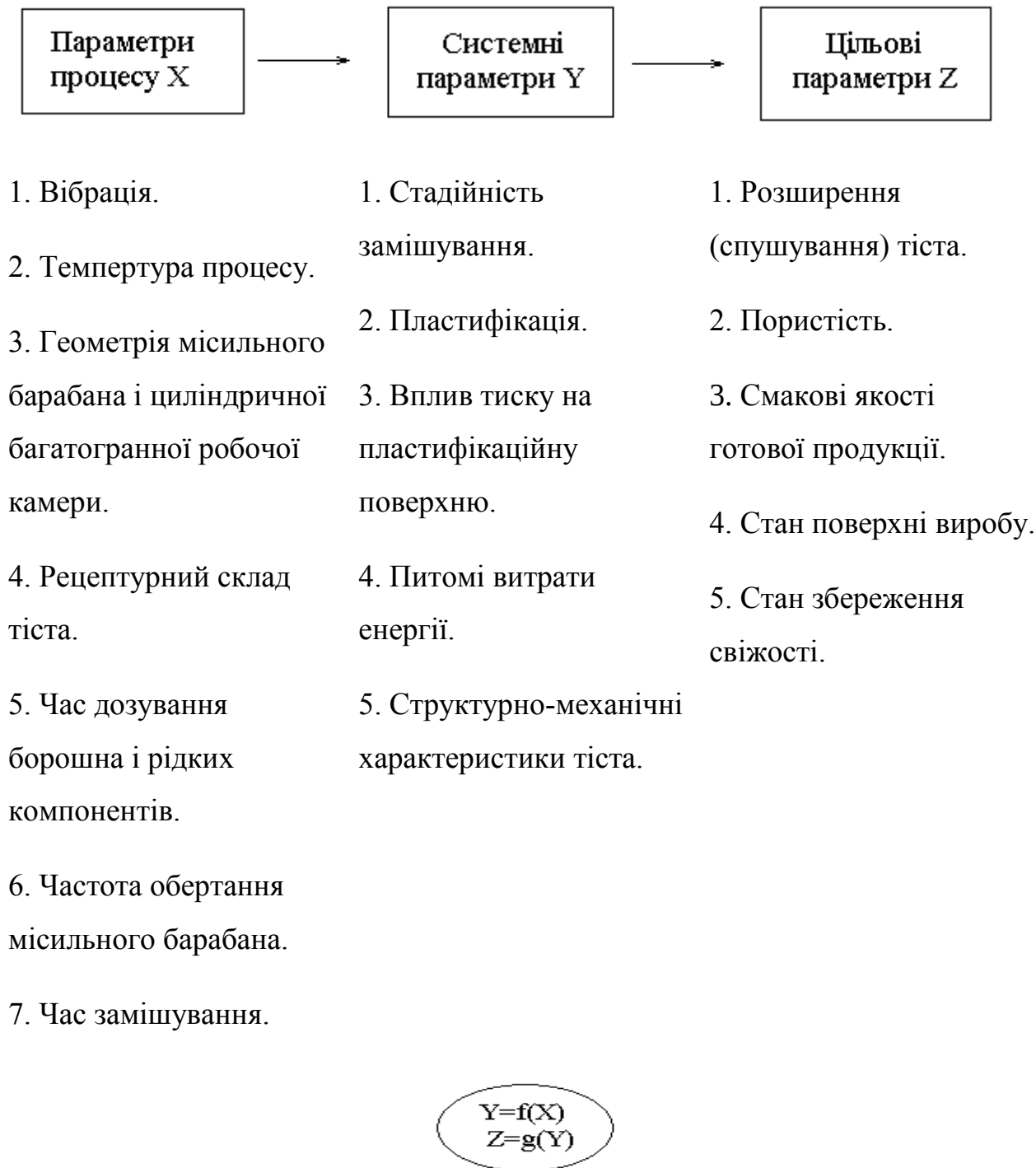


Рис. 3.1. Параметри і фактори процесу тістоутворення

У літературних джерелах відзначено [63,82,102,128,199], що при перевищенні певного граничного значення тиску відбувається небажана зміна структури тіста, погіршення його якостей, збільшення витрат електроенергії. Рациональна обробка компонентів позитивно впливає на колір м'якуша, сприяє поліпшенню структури пористості, підвищенню газоутворної здатності тіста.

З аналізу дослідів, виконаних у ВНДІХПі, встановлено, що стискання до $2 \cdot 10^5$ Па позитивно впливає на кінцевий продукт. Тому верхню межу робочого тиску автори пропонують обмежити саме цим значенням [63,85,99]. Але оптимальна комбінація показників якості тіста досягається при його величині $(1-2) \cdot 10^5$ Па. При меншому тиску знижуються витрати енергії, майже вдвічі зменшуються максимальні навантаження на всі рухомі елементи машини, підвищується тривалість і безвідмовність роботи. У закордонних машинах робочий тиск також приймають у межах $(0.5-1.2) \cdot 10^5$ Па.

На жаль, отримані у ВНДІХПі дані не можна безпосередньо використовувати при визначенні робочих параметрів процесу пластифікації тіста, оскільки замішування виконується робочими органами різної конструкції при різних реологічних показниках. Крім цього, процес пластифікації відбувається у закритій місткості місильної камери з відповідним профілем каналу під стискуванням. Певний відсоток вуглекислого газу розчиняється в тісті. Однак цими даними можна користуватися орієнтовно, звузивши під час експериментів інтервал тиску до найсприятливіших значень за допомогою регулятивної поверхні пластифікатора.

Вплив температури може відчуватися на етапі пластифікації. Саме від неї значно залежить коефіцієнт пружно-еластичного відновлення тіста. У поданій роботі температура дріжджового тіста протягом усього процесу вважається сталою і дорівнює $29 - 32^\circ\text{C}$, пластикація відбувається в ізотермічних умовах.

У відповідності до плану чисельних експериментів (див. рис. 2.1, 3.1) потрібно визначити:

1. Нормальні напруження σ_N . Тісто в профільному каналі багатогранної місильної камери перебуває в складному напруженому стані. При виході з поверхні пластифікатора тістові надається можливість відрелаксуватися, тобто набрати форми, що відповідає рівноважному стану. В цей час формується структура пористості й об'єм тістової маси. Тобто вона розширюється (розбухає) в усіх напрямках перерізу камери «відпочинку». За сучасними уявленнями

однією з головних причин, що викликає розбухання, є поява нормальних напружень при течії тіста каналом і їх дія після виходу з нього [10,15,24,27,128].

Нормальні напруження мають максимальне значення в пристінному сильно деформованому шарі, які після виходу з профільного каналу служать джерелом розвитку розбухання. Поверхневий шар ніби здувається [27,62]. З іншого боку, відомості про величини нормальних напружень дозволяють обчислити міцність елементів тістомісильної машини, що важливо при конструюванні, зокрема для вибору матеріалу обладнання. Тому дослідження нормальних напружень і факторів, що на них впливають, викликають значний практичний інтерес.

2. Дотичні напруження, що впливають на стан поверхні тістової маси. Їх урахування особливо важливе у процесі пластифікації, так як впливають на кінцеву якість процесу замішування.

3. Швидкість та динаміка руху тістової маси. Знаючи швидкість руху тістової маси, можна визначити час процесу замішування та вивантаження. Змодельовавши динаміку руху, можна оптимізувати геометрію тістомісильної машини, щоб уникнути застоїв тіста в певних зонах.

4. Розподіл гідродинамічного тиску. Знаючи його, можна прогнозувати, наскільки розрихленим, пористим буде виріб. При пластифікації велике значення має перепад тисків у формівному каналі та на виході з нього. Відомо [102,143], що величина перепадів тиску впливає на вуглекислий газ. Розчинений у тісті газ видаляється повільно. Готовий виріб матиме нерівномірну пористість. При великих перепадах призводить до надто інтенсивного виділення CO_2 і, як наслідок, до розривів поверхні хлібобулочних виробів.

3.3. Математичне моделювання процесу замішування тіста у дискретній безлопатевій тістомісильній машині

Враховуючи швидкий розвиток і великі можливості сучасної обчислювальної техніки, при розв'язанні проблеми визначення раціональних

параметрів процесу замішування і дальшого розроблення відповідного обладнання варто користуватися методами математичного моделювання.

У галузі замішування математичне моделювання застосовують досить широко, але замішування тіста безлопатевим робочим органом і регулятивною поверхнею пластифікатора – вперше. Ряд авторів [31,33,79,101,105] створили класичні математичні моделі, побудовані на рівняннях збереження руху в'язкого матеріалу, що враховують аномалію в'язкості. Однак у них передбачено перетворення отриманої системи диференціальних рівнянь до безрозмірно-критеріального вигляду з використанням критеріїв Re , Eu , Ec , Pe , що досить незручно.

Реологічні рівняння, що використовуються, не можуть задовільно описати поведінку дріжджового тіста з пружно-пластично-в'язкими характеристиками інших матеріалів. Тому потрібно знайти інший вираз для рівняння стану. Крім того, і залежність в'язкості від зовнішніх умов має характеризувати саме тісто відповідної рецептури. Недоліком багатьох робіт є неврахування сил тертя, що спрощує розв'язання поставлених завдань, але не дозволяє отримувати реальну картину процесу.

Таким чином, створювати математичну модель замішування методом ведення контролю за процесом деформації в профільному каналі багатогранної місильної камери треба з урахуванням реологічних особливостей тіста. Тісто, що деформується, отримує комплекс явищ характерних для даного процесу. Це – явища розтягування, кручення, стискання та тертя з відповідним рівнем розпушування тіста при пластифікації.

Математичні моделі дозволяють з меншими витратами часу і матеріальних ресурсів простежити за циклами процесу, що відбуваються в робочій камері, оптимізувати їх, а також отримати числові значення параметрів процесу, яких не можна виміряти за допомогою наявних приладів. Кінцевою метою досліджень є визначення необхідних параметрів проведення процесу замішування.

Створення математичної моделі будь-якого процесу передбачає постановку завдання, аналітичну, алгоритмічну і числову моделі [146]. Схема

моделювання класу фізичних явищ процесу замішування тіста наведена на рис. 3.2.

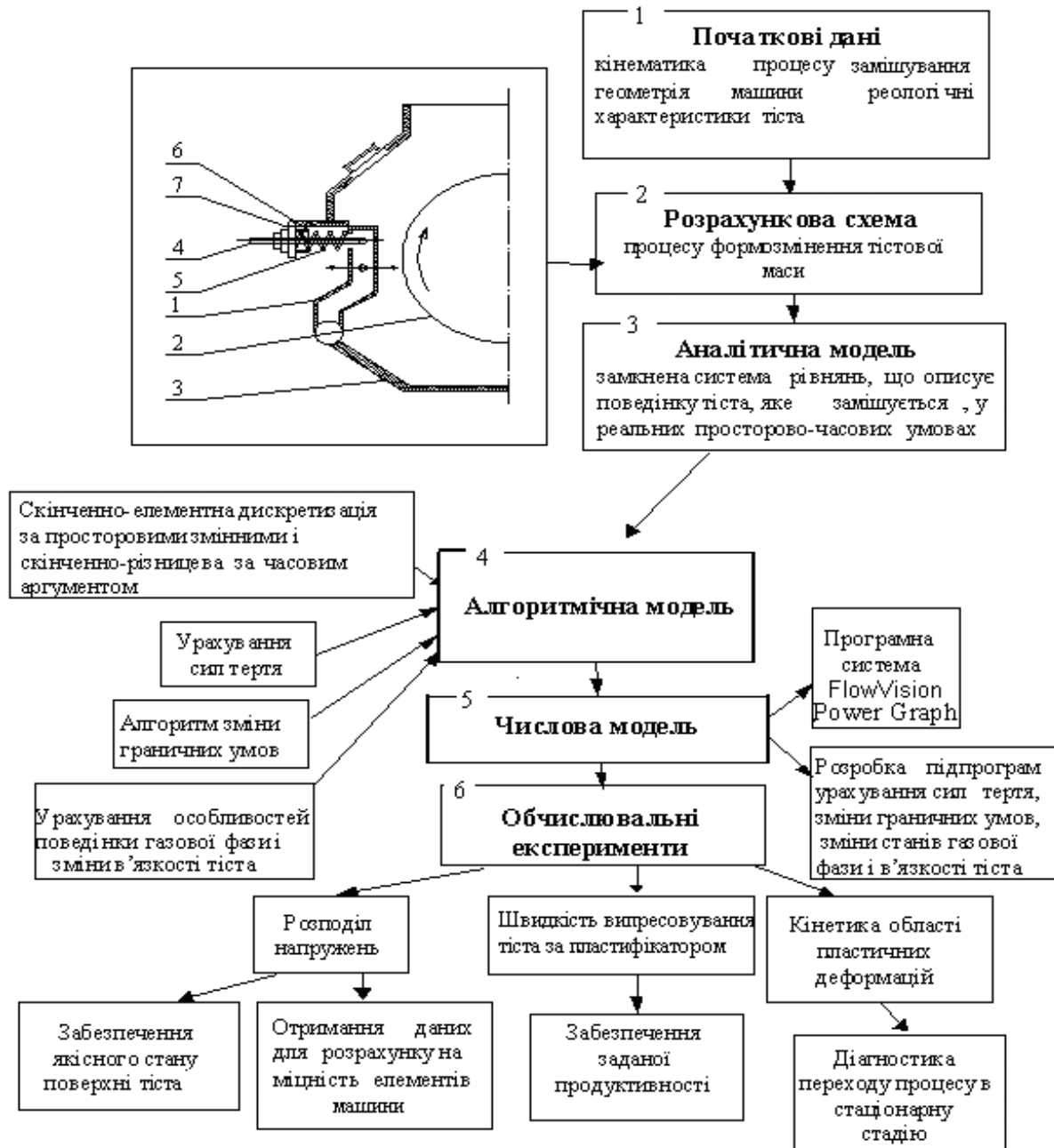


Рис. 3.2. Схема моделювання процесу замішування тіста на дискретній безлопатевій тістомісильній машині: 1 – каркас; 2 – барабан; 3 – корпус тістомісильної машини; 4 – гвинт; 5 – пружина; 6 – регулятивний пристрій; 7 – гайка

Відповідно до сучасних методів, що використовуються для характеристики процесів деформування матеріалів, сформулювати моделі поведінки досліджуваного середовища можна двома способами. Завдання механіки деформації тіста в рамках феноменологічного підходу також полягає в побудові математичних моделей, що задовільно описують основні закономірності й зв'язки макроскопічних характеристик для досліджуваного середовища в процесі деформування. Рівняння, що описують поведінку, можна поділити на три основні групи: кінематичні, динамічні (закони збереження) і визначальні (рівняння стану). Останні встановлюють залежність між кінематичними і динамічними змінними, що пов'язують напруження і швидкості деформацій. Одночасно характеризують матеріал, з якого складається середовище.

Теоретичні дослідження будь-якого процесу, в тому числі тістоутворення, досить складні, оскільки в моделі важко врахувати всі реальні закономірності поведінки тіста й умови роботи обладнання. Тому в числових експериментах завжди існують припущення та обмеження, що, проте, не повинні спотворювати кінцеві результати понад допустиму величину порівняно з даними фізичних досліджень.

У даному випадку не враховуємо температурних ефектів, вважаючи, що процеси деформування й масоперенесення відбуваються при сталій температурі, і припускаємо, що тісто як кінцевий продукт є середовищем:

- суцільним (рівномірно і неперервно заповнює об'єм багатогранної місильної камери);
- однорідним (в усіх точках тісто має однакові властивості);
- ізотропним (його властивості однакові в усіх напрямках).

Проблема коректного складання визначальних рівнянь і формулювання основних припущень є актуальною для розгляду процесу замішування, бо за своїми реологічними властивостями тісто належить до найменш вивчених і найскладніших систем, що суттєво впливають на життєдіяльність людського організму й стан здоров'я.

Далі визначаємо параметри, що впливають на властивості даного тіста. Залежність (або матеріальні функції) властивостей (наприклад, об'ємного вмісту структурних елементів середовища, особливості їх розташування та ін.) від параметрів стану задаються з певних міркувань, або планується система експериментів для встановлення виду цих функцій. Отже, феноменологічний підхід містить евристичні елементи при завданні контура моделі й потребує експериментальних досліджень для встановлення виду матеріальних функцій. Його доцільно використовувати для визначення значень технологічних параметрів і встановлення основних закономірностей процесів деформування гомогенних і гетерогенних середовищ.

Однак даний спосіб не дозволяє дослідити вплив структури і властивостей тіста (зокрема, його складу, кількості компонентів) на ці параметри, розкрити внутрішній механізм процесу.

Простежити вплив особливостей мікроструктури досліджуваного тіста на технологічні параметри, що розглядаються, дозволяє й інший спосіб (молекулярно-кінетичний, або статистичний), що базується на теоретичному аналізі поведінки окремого фрагмента тіста, що представляє його головні особливості. Такий фрагмент називають характерним елементом. При цьому вдається уникнути необхідності виконання експериментальних досліджень, пов'язаних зі визначенням матеріальних функцій.

У деяких випадках також вдається чисто теоретично визначити і зовнішній контур моделі, звівши таким чином до мінімуму її евристичну частину. Недоліком цього підходу, що лежить в основі багатьох методів визначення властивостей гетерогенних матеріалів у механіці мікронеоднорідних середовищ, є складність і порівняно невелика точність. Вона зобумовлена вихідними передумовами мікроаналізу. Статистичні методи становлять теоретичну базу феноменологічних.

Для побудови математичної моделі замішування тіста як функції часу і технологічних параметрів використовуємо феноменологічний підхід. Щоб впровадити відповідні феноменологічні співвідношення з механіки суцільного

середовища, що описують деформаційні процеси гетерогенних сумішей, треба сформулювати ряд припущень, головними з яких є:

- 1) розміри включень або неоднорідностей у суміші (діаметри дисперсних часток, пор) багаторазово перевищують молекулярно-кінетичні відстані;
- 2) розміри неоднорідностей набагато менші від відстаней, на яких середні макроскопічні параметри суміші або фази змінюються суттєво.

Таким чином, параметри неоднорідностей набагато менші від довжини і діаметра каналу безлопатевої тістомісильної машини, в якому тече двофазне середовище.

Перше припущення дозволяє використовувати класичні уявлення й рівняння механіки суцільних однофазних середовищ для описування процесів у масштабах самих неоднорідностей. При цьому описування фізичних властивостей фаз (в'язкості, пружності) базується на рівняннях і параметрах, отриманих з дослідів над відповідними речовинами в однофазному стані. Друге дозволяє описувати макроскопічні процеси в гетерогенній системі методами механіки суцільного середовища з допомогою середніх параметрів.

Особливості математичного описування гетерогенних на відміну від гомогенних сумішей полягають у використанні багатошвидкісної моделі з урахуванням динамічних ефектів, оскільки швидкості складових фаз не збігаються. Для гомогенних середовищ передбачається заповнення всього об'єму компонентами суміші рівноправно ($V_1 = V_2 = \dots = V_n = V$), тоді як для гетерогенного матеріалу кожна фаза займає лише частину об'єму суміші ($V_1 + V_2 + \dots + V_n = V$). У зв'язку з цим в теорії гетерогенних сумішей використовуються величини, що характеризують частки об'єму суміші, зайнятого кожною фазою: $\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n = 1$; ($\alpha_i \geq 0$).

Деформація кожної фази гетерогенного середовища пов'язана як з зміщенням зовнішніх границь виділеного об'єму (що характерно для гомогенних матеріалів), так з зміщенням міжфазних поверхонь всередині цього об'єму суміші. Тому, визначаючи напружений стан гетерогенного матеріалу, необхідно

враховувати умови сукупного деформування і руху фаз, а також структуру складових матеріалу (форму і розмір включень, їх розташування). Таким чином, проблема руху в рамках багатошвидкісної моделі полягає у задаванні умов спільного руху фаз і визначенні величин, що описують внутрішньофазові й міжфазові взаємодії.

3.3.1. Розроблення аналітичної моделі процесу замішування на ДБТМ

При математичному моделюванні тісто розглядається як суцільне середовище. Потреба в цьому зобумовлена необхідністю використовувати такі поняття, як напруження, деформація, густина, а також швидкості зміни цих параметрів. Перераховані тензорні та скалярні характеристики мають локальну природу і визначаються за допомогою операцій граничного переходу, коли елементи простору (об'єми і поверхні) стягуються до точок. У традиційних моделях континуума точки ототожнюються з частками середовища, що, в свою чергу, є елементарними носіями властивостей матеріалу [33,46]. Таке ототожнення для тіста ускладнюється через відсутність єдиної думки про те, що слід розуміти під часткою такого середовища.

Оскільки основні кінематичні аспекти поведінки тіста не відрізняються від притаманних іншим видам суцільних середовищ, у ньому можна виділити область, до якої застосовується ідеологія суцільного середовища. Аналітичний опис основних закономірностей процесу замішування побудований на загальновідомих законах збереження маси, рівняннях нерозривності, кількості руху і базується на основах фізико-хімічної механіки [140]. Рівняння руху в'язкого двофазного середовища в просторі між двома коаксіальними циліндрами покладене в основу математичної моделі процесу тістоутворення, враховуючи будову дискретної безлопатевої тістомісильної машини (ДБТМ).

Область, до якої можна застосувати ідеологію суцільного середовища, надалі називатимемо характерним об'ємом, ототожнюючи його з часткою тіста, що замішується. Будемо, однак, вважати, що розмір даного елемента значно

менший від розміру зразка для досліджень, а весь об'єм можна набрати з подібних елементів.

Використання граничних умов і диференційних операцій у подальшому викладі означає, що елементи простору, зайнятого тістом, стягуються до характерного елемента. Для спрощення математичного опису механічної поведінки тіста використовуватимемо просторове усереднення відповідних параметрів у твердій і газовій фазах.

Розглянемо певний характерний об'єм V , обмежений поверхнею Ω і зайнятий двофазною речовиною (дріжджовим тістом), що рухається (рис. 3.3).

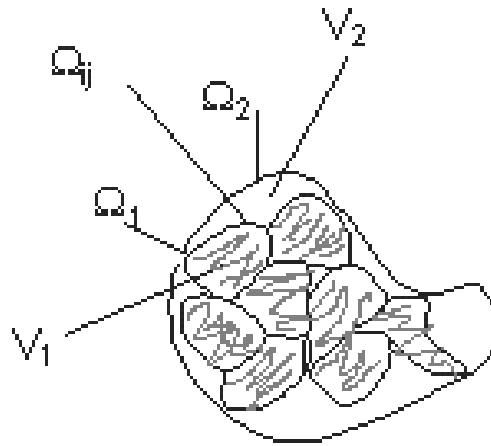


Рис. 3.3. Характерний об'єм V

Частина цього об'єму V_1 зайнята першою (твердо-рідинною) фазою, решта V_2 – газовою ($V = V_1 + V_2$). Аналогічно частина граничної поверхні Ω_1 належить твердій фазі, інша Ω_2 – газовій ($\Omega = \Omega_1 + \Omega_2$). Всередині об'єму V існує (загалом багатозв'язна) поверхня поділу фаз Ω_{ij} ($i, j = 1, 2, i \neq j$).

При модельному описі механічної поведінки тіста в процесі деформування використовуємо гіпотезу про нерозривність у рамках закону збереження маси для твердо-рідкої фази. Рівняння динаміки збереження кількості руху дисперсного середовища в декартових координатах мають такий вигляд:

$$\begin{aligned}
\rho \left(\frac{\partial v_1}{\partial t} + V_1 \frac{\partial v_1}{\partial x_1} + V_2 \frac{\partial v_1}{\partial x_2} + V_3 \frac{\partial v_1}{\partial x_3} \right) &= \rho F_1 + \frac{\partial P_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial P_{21}}{\partial x_2} + \frac{\partial P_{31}}{\partial x_3}; \\
\rho \left(\frac{\partial v_2}{\partial t} + V_1 \frac{\partial v_2}{\partial x_1} + V_2 \frac{\partial v_2}{\partial x_2} + V_3 \frac{\partial v_2}{\partial x_3} \right) &= \rho F_2 + \frac{\partial P_{12}}{\partial x_1} + \frac{\partial P_{22}}{\partial x_2} + \frac{\partial P_{32}}{\partial x_3}; \\
\rho \left(\frac{\partial v_3}{\partial t} + V_1 \frac{\partial v_3}{\partial x_1} + V_2 \frac{\partial v_3}{\partial x_2} + V_3 \frac{\partial v_3}{\partial x_3} \right) &= \rho F_3 + \frac{\partial P_{13}}{\partial x_1} + \frac{\partial P_{23}}{\partial x_2} + \frac{\partial P_{33}}{\partial x_3}.
\end{aligned} \quad (3.1)$$

де V_1, V_2, V_3 - компоненти вектора швидкості; F_1, F_2, F_3 - компоненти об'ємної сили, P_{ij} - компоненти тензора напружень.

До рівняння (3.1) потрібно додати рівняння збереження маси, його ще називають рівнянням нерозривності:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_1} (\rho V_1) + \frac{\partial}{\partial x_2} (\rho V_2) + \frac{\partial}{\partial x_3} (\rho V_3) = 0. \quad (3.2)$$

У випадку, коли поле стаціонарне, то часткові похідні за часом у формулах (3.1), (3.2) зникнуть. Якщо $\rho = \text{const}$, то рівняння (3.2) перепишемо

$$\text{div } \vec{v} = \frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \frac{\partial v_2}{\partial x_2} + \frac{\partial v_3}{\partial x_3} = 0. \quad (3.3)$$

Найпростішою моделлю рідини, яка має в'язкі властивості, є модель, що підлягає узагальненому закону Ньютона. В декартових координатах цей закон можна записати так:

$$\begin{aligned}
P_{ii} &= -P + 2\mu \frac{\partial v_i}{\partial x_i} \quad (i = 1, 2, 3); \\
P_{ij} &= P_{ji} = \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right),
\end{aligned} \quad (3.4)$$

де μ – коефіцієнт в'язкості.

Якщо підставити (3.4) у рівняння руху (3.2) і вважати, що рідина нестислива (тобто справедливе рівняння (3.3)), то отримаємо рівняння руху нестисливої в'язкої рідини, які називають рівняннями Нав'є-Стокса:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial V_1}{\partial t} + V_1 \frac{\partial V_1}{\partial x_1} + V_2 \frac{\partial V_1}{\partial x_2} + V_3 \frac{\partial V_1}{\partial x_3} &= F_1 - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_1} + \nu \nabla^2 V_1; \\
\frac{\partial V_2}{\partial t} + V_1 \frac{\partial V_2}{\partial x_1} + V_2 \frac{\partial V_2}{\partial x_2} + V_3 \frac{\partial V_2}{\partial x_3} &= F_2 - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_2} + \nu \nabla^2 V_2; \\
\frac{\partial V_3}{\partial t} + V_1 \frac{\partial V_3}{\partial x_1} + V_2 \frac{\partial V_3}{\partial x_2} + V_3 \frac{\partial V_3}{\partial x_3} &= F_3 - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_3} + \nu \nabla^2 V_3,
\end{aligned} \tag{3.5}$$

де $\nu = \frac{\mu}{\rho}$.

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2}. \tag{3.6}$$

У циліндричних координатах r, φ, z рівняння (3.5), (3.3) запишемо так:

$$\frac{\partial V_r}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_\varphi}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \varphi} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} - \frac{V_\varphi^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + \nu \left(\nabla^2 V_r - \frac{V_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} \right); \tag{3.7}$$

$$\frac{\partial V_z}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{V_\varphi}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \varphi} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \nabla^2 V_z,$$

де позначено

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \tag{3.8}$$

До рівняння руху (3.7) слід додати рівняння нестисливості, що в циліндричних координатах запишемо так:

$$\frac{\partial(rV_r)}{\partial r} + \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial(rV_z)}{\partial z} = 0. \tag{3.9}$$

При вивченні руху тіста в місильній камері об'ємними силами нехтуємо, тому вони в рівняннях (3.7) відсутні. У рівняннях (3.7), (4.9) V_r, V_φ, V_z - проекції вектора швидкості частинки на осі циліндричної системи координат, густина і кінематичний коефіцієнт в'язкості, які вважаються постійними.

Щоб урахувати особливість конструкції ДБТМ, вважатимемо, що циліндри ексцентрично розміщені, як на рис. 3.4. Зовнішній циліндр (робоча

камера) радіусом R' з центром у точці O' нерухомий, а внутрішній (місильний барабан) радіусом R з центром у точці O обертається з заданою кутовою швидкістю ω . Далі вважаємо, що ексцентриситет $e = O'O$ малий порівняно з радіусами R і R' ($R' > R$) рухомого й нерухомого циліндрів.

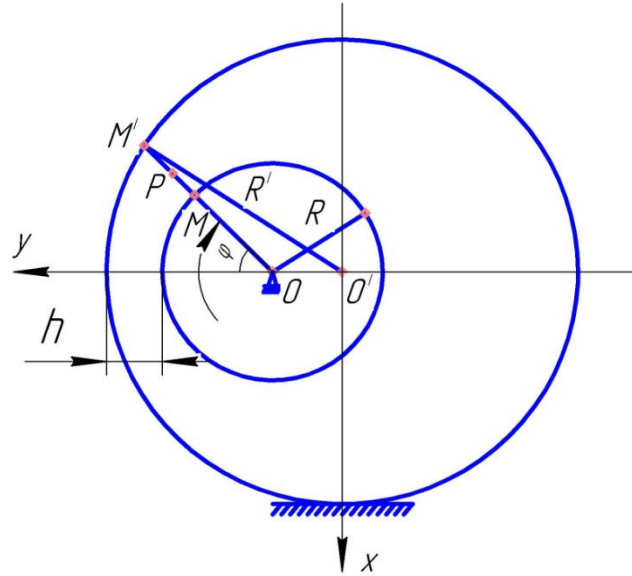


Рис. 3.4. Схема руху коаксіальних циліндрів

Вважається, що в напрямку вздовж осі z (перпендикулярно до площини рисунка) крайовими ефектами в цьому напрямку можна знехтувати, так як боковинки мають усього 1.2% до загальної площі контакту, що явно не вплине на загальну картину процесу замішування. Тому розглянемо плоский рух проміжку між циліндрами.

Положення будь-якої точки P в області руху визначаємо полярними координатами $r = OP$ і φ , де r - відстань до біжучої точки від точки O і φ - кут, який утворює радіус OP з віссю ігреків. Позначимо відстань $MM' = h(\varphi)$, то робоча область задається нерівностями $R \leq r \leq R + h(\varphi)$, $0 \leq \varphi \leq 2\pi$. Вважаємо, що $OO' = e$ мала порівняно з $R' = O'M$.

Тоді наближено можна вважати, що

$$O'M' = R' = OO' \cos \varphi + OM' = e \cos \varphi + R + h(\varphi).$$

Тоді

$$R'^2 = e^2 + (OM')^2 - 2eOM' \cos(\pi - \varphi) =$$

$$= e^2 + (OM')^2 + 2eOM' \cos \varphi (OM')^2 + 2e \cos \varphi OM' + (e^2 - R^2) = 0;$$

$$OM' = \frac{-2e \cos \varphi \pm \sqrt{4e^2 \cos^2 \varphi - 4(e^2 - R'^2)}}{2} = -e \cos \varphi \pm \sqrt{(R'^2 - e^2) + e^2 \cos^2 \varphi};$$

$$h(\varphi) = -R - e \cos \varphi \pm \sqrt{(R'^2 - e^2) + e^2 \cos^2 \varphi}.$$

Якщо $\varphi = (0; \pi)$, то $\sqrt{} = R'$. Отже, знак “-” відпадає, бо $h > 0$.

$$h(\varphi) = \sqrt{R'^2 - e^2 + e^2 \cos^2 \varphi} - R - e \cos \varphi;$$

$$h(\varphi) = \sqrt{R'^2 - e^2(1 - \cos^2 \varphi)} - R - e \cos \varphi.$$

$$h(\varphi) = \sqrt{R'^2 - e^2 \sin^2 \varphi} - (R + e \cos \varphi). \quad (3.10)$$

Якщо $R' \gg e$, то $\sqrt{R'^2 - e^2 \sin^2 \varphi} \cong R'$ і для $h(\varphi)$ можна використовувати формулу: $h(\varphi) \cong R' - R - e \cos \varphi$.

Вважаємо надалі, що рух тіста в проміжку між циліндрами повільний у тому сенсі, що можна знехтувати інерційними членами порівняно з тими, які враховують в'язкі сили і зміни тиску. Враховуючи також відносну сталість проміжку між циліндрами, вважатимемо, що мають місце нерівності [94]

$$V_\varphi \gg V_r; \quad \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial r^2} \gg \frac{1}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial r}, \quad \frac{1}{r^2} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi^2}, \quad \frac{1}{r^2} \frac{\partial V_r}{\partial \varphi}, \quad \frac{V_\varphi}{r^2};$$

$$\frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} \gg \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r}, \quad \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_r}{\partial \varphi^2}, \quad \frac{1}{r^2} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi}, \quad \frac{V_r}{r^2}.$$

Внаслідок цього, а також, враховуючи, що $V_z = 0$, рівняння (3.5), (3.7) запишемо у спрощеному вигляді так:

$$\mu \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial r^2} = \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \varphi};$$

$$\mu \frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} = \frac{\partial P}{\partial r}; \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial}{\partial r} (r V_r) + \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} = 0.$$

де $\mu = \rho V$ – динамічний коефіцієнт в'язкості. Внаслідок перерахованих вище

причин $\frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} \ll \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial r^2}$ і з перших двох

$$\text{рівнянь (3.5) випливає } \frac{\partial P}{\partial r} \ll \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \varphi}. \quad (3.12)$$

Це дозволяє надалі вважати: $\frac{\partial P}{\partial r} \approx 0$, а тиск залежить від кута φ , тобто

$P = P(\varphi)$, що встановлює пряму залежність розміщення поверхні пластифікатора до робочого органу.

3.3.2. Рівняння руху тіста під час замішування

Визначальні співвідношення, або рівняння стану, пов'язують макроскопічні напруження, що виникають у тісті. Якісні характеристики кінематичних змін тіста пов'язані з макроскопічними швидкостями деформацій. Застосування тензора швидкостей деформацій, а не тензора деформацій, зумовлено тим, що ущільнення тіста всередині місильної камери є незворотним процесом, пов'язаним з дисипацією енергії. В цьому випадку однозначний зв'язок між напруженнями і деформаціями втрачає сенс. Силова реакція середовища, що необернено деформується, визначається швидкістю зміни даної конфігурації.

При дослідженні процесу замішування тіста важливу роль відіграє його швидкість утворення, що залежить від сприятливих умов його руху в місильній

камері. Тому є потреба доповнити й обґрунтувати модель (3.9), описану вище, оскільки застосування наявної ідеології не дозволяє повністю подати суттєві конструктивно-технологічні особливості процесу і тому потребує адаптації. З цією метою враховано об'ємний секундний видаток, напруження сили тертя на поверхні внутрішнього циліндра, момент опору тіста обертового барабана, особливості поведінки тіста під час стискання під впливом навантаження, утвореного поверхнею пластифікатора та поверхнею місильного барабана.

Обґрунтуємо швидкість руху маси тіста, оскільки за прийнятим допущенням його переміщення починається, коли місильний барабан забирає тісто після релаксації. Швидкість місильного барабана в даному випадку більша, ніж швидкість тіста, але з плином часу їх швидкості змінюються. Для визначення швидкості тіста в місильній камері, що змінюється і залежить від кута φ , а також враховуючи умови (3.10), проінтегруємо перше рівняння (3.9) за таких граничних умов: $V_\varphi = \omega R$ при $r = R$, $V_\varphi = 0$ при $r = R + h(\varphi)$.

У результаті подвійного інтегрування і задоволення умов, знайдемо:

$$\begin{aligned}\omega R &= \frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial \varphi} R(\ln R - 1) + C_1(\varphi)R + C_2(\varphi); \\ C_2(\varphi) &= \omega R - C_1(\varphi)R - \frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial \varphi} R(\ln R - 1); \\ V_\varphi &= \frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial \varphi} [r(\ln r - 1) - R(\ln R - 1)] + C_1(\varphi)(r - R) + \omega R; \\ 0 &= \frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial \varphi} \{(R + h)[\ln(R + h) - 1] - R(\ln R - 1)\} + C_1(\varphi)(R + h - R) + \omega R; \\ C_1(\varphi)h &= -\frac{1}{h\mu} \frac{\partial P}{\partial \varphi} \{(R + h)[\ln(R + h) - 1] - R(\ln R - 1)\} - \frac{\omega R}{h}; \\ V_\varphi &= \frac{1}{\mu h} \frac{\partial P}{\partial \varphi} \{hr \ln r - (r - R)(R + h)\ln(R + h) - (R + h - r)R \ln R\} + \frac{\omega R}{h}(R + h - r).\end{aligned}\quad (3.13)$$

Визначимо середню за січенням швидкість V_φ за формулою

$$\overline{V}_\varphi = \frac{1}{h} \int_R^{R+h} V_\varphi dr. \quad (3.14)$$

Підставляючи (3.13) в (3.14), знайдемо

$$\int r \ln r dr = \frac{r^2}{2} \left(\ln r - \frac{1}{2} \right); \quad \int r dr = \frac{r^2}{2}.$$

$$V_\varphi = \frac{1}{\mu h} \frac{\partial P}{\partial \varphi} \{ hr \ln r - r[(R+h) \ln(R+h) - R \ln R] + R(R+h)[\ln(R+h) - \ln R] \} - r \frac{\omega R}{h} + (R+h) \frac{\omega R}{h}$$

$$\frac{r^2}{2} \left(\ln r - \frac{1}{2} \right) \Big|_R^{R+h} = \frac{(R+h)^2}{2} \left[\ln(R+h) - \frac{1}{2} \right] - \frac{R^2}{2} \left(\ln R - \frac{1}{2} \right);$$

$$\frac{r^2}{2} \Big|_R^{R+h} = \frac{1}{2} [(R+r)^2 - R^2] = \frac{1}{2} (R^2 + 2Rh + h^2 - R^2) = \frac{h}{2} (2R+h).$$

$$\int_R^{R+h} C dr = Ch.$$

$$\begin{aligned} \overline{V}_\varphi &= \frac{1}{\mu h^2} \frac{\partial P}{\partial \varphi} \left\{ \frac{h}{2} (R+h)^2 + \left[\ln(R+h) - \frac{1}{2} \right] - \frac{hR^2}{2} \left(\ln R - \frac{1}{2} \right) - \right. \\ &\quad \left. - \frac{h}{2} (2R+h) [(R+h) \ln(R+h) - R \ln R] + Rh(R+h) [\ln(R+h) - \ln R] \right\} - \\ &\quad - \frac{\omega R}{h^2} \frac{h}{2} (2R+h) + \frac{\omega R}{h^2} (R+h)h = \\ &= \frac{1}{\mu h} \frac{\partial P}{\partial \varphi} \left\{ (R+h) \ln(R+h) \left[\frac{R+h}{2} - \frac{2R+h}{2} + \frac{2R}{2} \right] - \right. \\ &\quad \left. - R \ln R \left[\frac{R}{2} - \frac{2R+h}{2} + \frac{2R+2h}{2} \right] - \frac{1}{4} (R^2 + 2Rh + h^2 - R^2) \right\} + \frac{\omega R}{h} \left(\frac{2R+2h}{2} - \frac{2R+h}{2} \right) = \\ &= \frac{1}{\mu h} \frac{\partial P}{\partial \varphi} \left\{ \frac{1}{2} R(R+h) \ln(R+h) - \frac{1}{2} R(R+h) \ln R - \frac{h}{4} (2R+h) \right\} + \frac{\omega R}{2} = \\ &= \frac{R(R+h)}{2\mu h} \frac{\partial P}{\partial \varphi} \left[\ln(R+h) - \ln R - \frac{2h(2R+h)}{R(R+h)4} \right] + \frac{\omega R}{2} \end{aligned}$$

$$\overline{V}_\varphi = \frac{R(R+h)}{2\mu h} \frac{\partial P}{\partial \varphi} \left[\ln \left(1 + \frac{h}{R} \right) - \frac{h}{2} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R+h} \right) \right] + \frac{\omega R}{2}. \quad (3.15)$$

Проінтегруємо третє рівняння (3.9) по r від R до $R+h$

$$\begin{aligned} \int_R^{R+h} \frac{\partial}{\partial r} (rV_r) dr &= - \int_R^{R+h} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} dr; \\ - \frac{\partial}{\partial r} \int_R^{R+h} V_\varphi dr &= 0; \\ - \frac{\partial}{\partial r} (h\overline{V}_\varphi) &= 0. \end{aligned} \quad (3.16)$$

Враховуючи непроникність твердих стінок і, відповідно, умови $V_r = 0$ при $r = R$ і $r = R+h$, знайдемо

$$h\overline{V}_\varphi = Q = \text{const}, \quad (3.17)$$

де Q – невідома величина, що виражає секундний об’ємний видаток тіста через довільне січення $\varphi = \text{const}$. Порівнюючи (3.17) і (3.15), отримаємо об’ємний розхід тіста через формівний отвір, утворений поверхнею пластифікатора і місильного барабана

$$Q = \frac{R(R+h)}{2\mu h} \cdot \frac{\partial P}{\partial \varphi} \left[\ln \left(1 + \frac{h}{R} \right) - \frac{h}{2} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R+h} \right) \right] + \frac{\omega Rh}{2} \quad (3.18)$$

Отже, розхід тіста залежить від ряду факторів: величини стискання тіста, в’язкості, частоти обертання місильного барабана і формівного каналу (див. додаток А1, А2).

3.3.3. Визначення напруження тертя на поверхні місильного барабана

Існування тертя, зумовленого контактною взаємодією тіста між поверхнею робочої камери і місильним барабаном, що деформується, характерне для всіх стадій замішування. На деяких з них його можна ігнорувати, на інших воно значно впливає на якість готової продукції. Тертя при замішуванні тіста спричиняє негативні наслідки: збільшуються нормальні напруження на контактній поверхні пластифікатора, спостерігається нерівномірність швидкостей витікання через прямокутну щілину. При математичному моделюванні процесу замішування врахування напруження тертя дозволяє наблизити модель до реальності.

Напруження тертя діє перпендикулярно до контактної поверхні місильного барабана. Іншою проблемою є відсутність у літературі точних значень коефіцієнтів тертя μ , що характеризують взаємодію тіста з поверхнею машин і апаратів. Адже ця величина залежить від рецептури, режимів навантаження й умов, при яких виконуються дослід. В даній роботі напруження тертя тіста визначаємо за формулою

$$\tau_w = \mu \left(\frac{\partial v_\varphi}{\partial r} \right)_{r=R}. \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} \right|_{r=R} &= \frac{1}{\mu h} \cdot \frac{\partial P}{\partial \varphi} \left\{ h(1 + \ln r) - (R + h) \ln(R + h) + R \ln R \right\} \Big|_R - \frac{\omega R}{h} = \\ &= \frac{1}{\mu h} \cdot \frac{\partial P}{\partial \varphi} \left[h - (R + h) \ln \left(1 + \frac{h}{R} \right) \right] - \frac{\omega R}{h} \end{aligned}$$

$$\tau_w = \frac{1}{h} \cdot \frac{\partial P}{\partial \varphi} \left[h - (R + h) \ln \left(1 + \frac{h}{R} \right) \right] - \frac{\omega R \mu}{h}$$

$$\tau_w = \frac{2\mu \left(Q - \frac{\omega R h}{2} \right)}{R h (R + h)} \cdot \frac{h - (R + h) \ln \left(1 + \frac{h}{R} \right)}{\ln \left(1 + \frac{h}{R} \right) - \frac{h}{2} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R + h} \right)} - \frac{\omega R \mu}{h}$$

$$\begin{aligned}
\tau_w &= \frac{2\mu \left(Q - \frac{\omega R h}{2} \right)}{R h (R + h)} (- (R + h)) \frac{\ln \left(1 + \frac{h}{R} \right) - \frac{h}{R + h}}{\ln \left(1 + \frac{h}{R} \right) - \frac{h}{R + h} \left(1 + \frac{h}{2R} \right)} - \frac{\omega R \mu}{h} = \\
&= \frac{2\mu \left(\frac{\omega R h}{2} - Q \right)}{R h} \frac{\ln \left(1 + \frac{h}{R} \right) - \frac{h}{R + h}}{\ln \left(1 + \frac{h}{R} \right) - \frac{h}{R + h} \left(1 + \frac{h}{2R} \right)} - \frac{\omega R \mu}{h}. \quad (3.20)
\end{aligned}$$

Знайдемо віднесенний до одиниці довжини місильного барабана момент опору тіста обертового барабана (внутрішнього циліндра)

$$L_w = \int_0^{2\pi} \tau_w R^2 d\varphi. \quad (3.21)$$

Отже, на момент опору тіста значною мірою впливає напруження тертя при замішуванні та його розміщення в робочій камері машини відносно місильного барабана (див. додаток А3).

3.4. Визначення параметрів напружено-деформованого стану тіста методом математичного і комп'ютерного моделювання

Враховуючи швидкий розвиток і великі можливості сучасної обчислювальної техніки, при розв'язанні завдань визначення раціональних параметрів проведення процесу замішування і подальшого розроблення відповідного обладнання варто користуватися методами комп'ютерного моделювання.

Моделювання дозволяє з меншими затратами часу і матеріальних ресурсів простежити за циклами процесів, що відбуваються в робочій камері, оптимізувати їх, а також отримати числові значення параметрів процесу, які неможливо виміряти за допомогою наявних приладів. Кінцевою метою досліджень є визначення необхідних параметрів проведення процесу замішування.

На даному етапі розвитку математичного та комп'ютерного моделювання гідродинамічних процесів з'явилася можливість з великою точністю відтворити процеси, що відбуваються під час замішування: спостерігати траєкторію руху компонентів, визначати застійні зони, порівнювати ефективність роботи різних місильних органів. Для дослідження основних закономірностей процесу замішування обрано програмний пакет для персональних комп'ютерів у середовищі FlowVision російської фірми «Тесис» [88].

Геометрію було побудовано в САПР 3D Компас 12, експортовано в формат STL, який використовується FlowVision. Для обчислень було застосовано модель течії з вільною поверхнею та моделі масопереносу змішуваних компонентів [79,94].

Модель використовує функцію VOF, що набирає значення 0 (газ) та 1 (рідина). Вільна поверхня є набором фасеток, що відтинають розрахункову область. Обчислюються всі комірки з рідиною. У моделі використовуються такі рівняння:

1. Рівняння Нав'є-Стокса:

$$\frac{\partial w}{\partial \tau} + \nabla(VV) = -\frac{\nabla P}{\rho} + \frac{1}{\rho} \nabla(\mu + \mu_t) [\nabla V + (\nabla V)^T] + \left(1 - \frac{\rho_{hyd}}{\rho}\right) g$$

$$\nabla V = 0.$$

де: ρ - густина тіста; μ - динамічна вязкість тіста; μ_t - турбулентна динамічна вязкість тіста; ω - кутова швидкість обертання; τ - час замішування; V - швидкість руху компонентів; ρ_{hyd} - початкова густина тіста; ∇ - оператор Гамільтона; $\left(1 - \frac{\rho_{hyd}}{\rho}\right) g$ - векторне поле масових сил; $[\nabla V + (\nabla V)^T]$ - оператор Лапласа.

2. Рівняння енергії:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla(Vh) = \frac{1}{\rho} \nabla \left(\left(\frac{\lambda}{C_p} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \nabla h \right) + \frac{Q}{\rho},$$

де: C_p – питома теплоємність тіста; λ – коефіцієнт теплопровідності; P_{r_t} – число Прандтля; Q – кількість тепла; V – швидкість теплоносія; h – ентальпія.

3. Рівняння перенесення функції заповнення F :

$$\frac{\partial F}{\partial t} + V \nabla F = 0,$$

де: F – степінь заповнення тістом робочої камери; t – час процесу.

4. Рівняння масоперенесення змішуваних компонент:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla(VC) = \frac{1}{\rho} \nabla \left(\left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla C \right),$$

де: Sc – число Шмідта; Sc_t – турбулентне число Шмідта; C – масова концентрація.

На етапі формування завдання задаються умови контактної взаємодії матеріалу з обладнанням (дані про геометрію поверхонь тертя і коефіцієнт тертя), значення структурно-механічних характеристик тіста, що деформується.

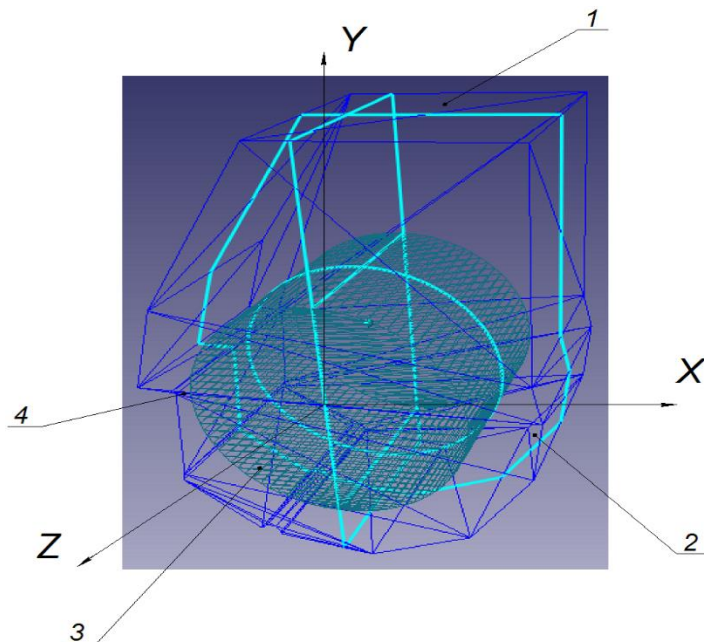


Рис. 3.5. Модель безлопатевої дискретної тістомісильної машини: 1 – горловина завантаження; 2 – корпус робочої камери; 3 – безлопатевий робочий орган; 4 – пасивний вібраційний пристрій (ПВП)

На рисунку 3.5 наведено технологію фасетного розділення геометрії пілотного зразка, що дозволяє імпортувати геометрію для візуальних досліджень. На вузлові точки пристінних елементів накладені граничні умови – на вертикальних поверхнях задані обмеження в переміщеннях у напрямку x (відповідно $u_x = 0$), на похилих – обмеження у переміщенні в напрямку x_u і кут нахилу поверхні α ; також заданий тиск p , що діє на поверхню навантаження.

Після формулювання визначальних співвідношень завдання доповнюється граничними і початковими умовами, що зазвичай вибирають з урахуванням геометрії контуру досліджуваного тіста, його структури й конкретних умов взаємодії з пластифікатором.

Граничні умови, що відповідають умовам механічного навантаження тіста в процесі пластифікації та кінематики взаємодії системи «місильна камера» – тісто:

1. На поверхні механічного навантаження місильного барабана 2 і робочої камери 3 (див. рис. 3.2) задається рівномірно розподілений тиск.
2. На контактних поверхнях пасивного вібраційного пристрою 1 і місильного барабана 2 в період пластифікації задаються кінематичні обмеження у напрямку нормалі до відповідних поверхонь.
3. На цих же поверхнях даються сили тертя у напрямку, протилежному до напрямку руху.
4. Поверхня виходу тіста з ділянки дії пасивного вібраційного пристрою - вільна.

Надалі вважаємо, що подані крайові умови забезпечують одиничність розв'язку рівнянь.

Специфічною особливістю напружено-деформованого стану тіста є урахування й дослідження впливу на процес сил тертя, що, в свою чергу, визначаються нормальними напруженнями σ_N і коефіцієнтом тертя μ . Зокрема на рис. 3.6 наведено вплив коефіцієнта тертя на дотичні напруження τ у тісті в пристінній області: при припущенні існування повністю прилиплому шару ($\mu=1$),

після урахування сил тертя ($\mu=0,68$), а також за умови вільного ковзання ($\mu=0,6$). У даній роботі коефіцієнт тертя μ тіста по сталі орієнтовно прийнятий, виходячи із літературних джерел [86,102,147]

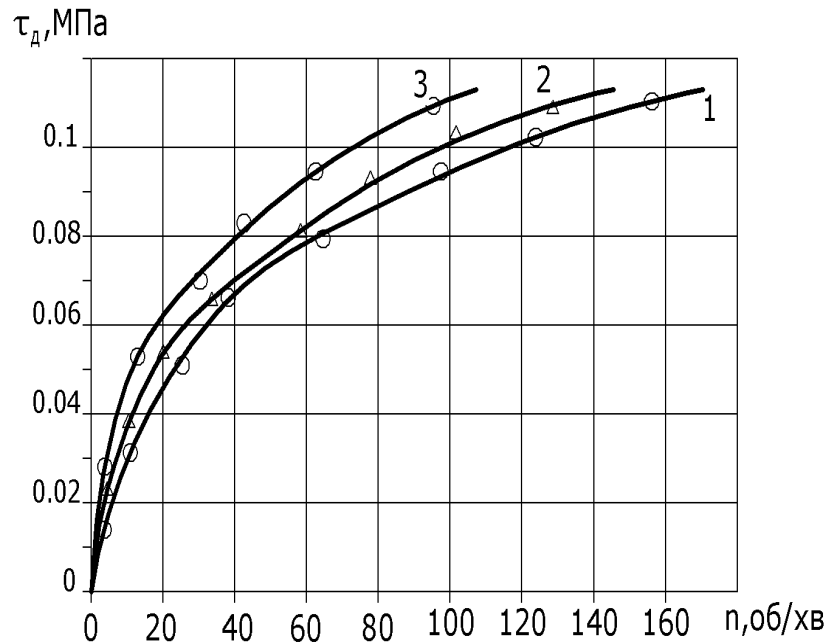


Рис. 3.6. Залежність дотичного напруження на боковій поверхні формівного каналу від частоти обертання барабана при коефіцієнті тертя μ : 1 – 0; 2 – 0.68; 3 – 1

З графічної залежності бачимо, що збільшення коефіцієнта тертя призводить до збільшення дотичних напружень у пристінних елементах. Спостерігається незначна зміна коефіцієнта тертя за різних значень частоти обертання місильного барабана в границях 80–100 об/хв, що пояснюється величиною дотичних напружень. Наслідком цього є погіршення органолептичних показників готової продукції – розриви поверхонь заготовок, нерівномірна пористість. Тому для поліпшення якості хлібобулочних виробів і забезпечення цілості їх поверхні, сили тертя треба зменшувати за рахунок точності обробки поверхні місильної камери та зменшення частоти обертання місильного барабана від 150 до 100 об/хв. Це підтверджується даними роботи [92,99,124], де розкрито вплив тертя на процес тістоутворення.

Необхідно зауважити, що коефіцієнт тертя μ впливає на кінетику процесу тістоутворення, зокрема на швидкість переміщення тістової маси формуючим каналом (рис.3.7). Вплив коефіцієнта тертя залежить від ряду чинників, згаданих вище.

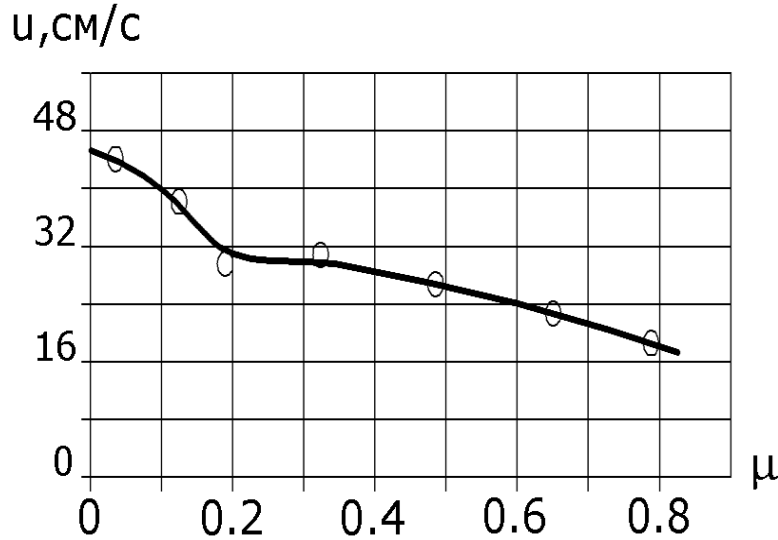


Рис. 3.7. Вплив коефіцієнта тертя на швидкість переміщення тістової маси u

При малих коефіцієнтах тертя від 0.2 до 0.4 спостерігається рівномірне переміщення тістової маси з швидкістю 30 см/с, а при суттєвому збільшенні коефіцієнта тертя від 0.5 до 0.9 призводить до помітного зниження швидкості переміщення (відповідно від 24 до 16 см/с).

Дільниця з великими швидкостями є на першій стадії замішування, коли відбувається процес дозування компонентів. За таких умов коефіцієнт тертя плавно впливає на перемішування, а при значенні 0.2 – 0.4, коли починають утворюватися грудочки тіста і формуються в суцільну масу, швидкість руху становить 32см/с.

Отже, на основі даних фізичних експериментів і результатів відповідних їм чисельних обчислень, можна запропонувати методику визначення коефіцієнтів тертя для різних умов взаємодії пари «продукт – місильна камера». Порівнюючи відповідні результати, можна розв’язати так звану “зворотну”

задачу, тобто визначити коефіцієнт μ , а також оцінити ефективність і доцільність використання певного матеріалу для конструювання обладнання.

Маючи дотичні та нормальні напруження на поверхні барабана тістомісильної машини, можна отримати залежності необхідних моментів обертання $\left(M = \int_A \tau_d \cdot R \cdot dA \right)$, а маючи залежності моментів та значення необхідної частоти обертання вала, можна отримати залежності необхідних потужностей $\left(N = \frac{\pi \cdot M \cdot n}{30} \right)$.

де τ_d – дотичні напруження; R – радіус місильного барабана; n – частота обертання місильного барабана.

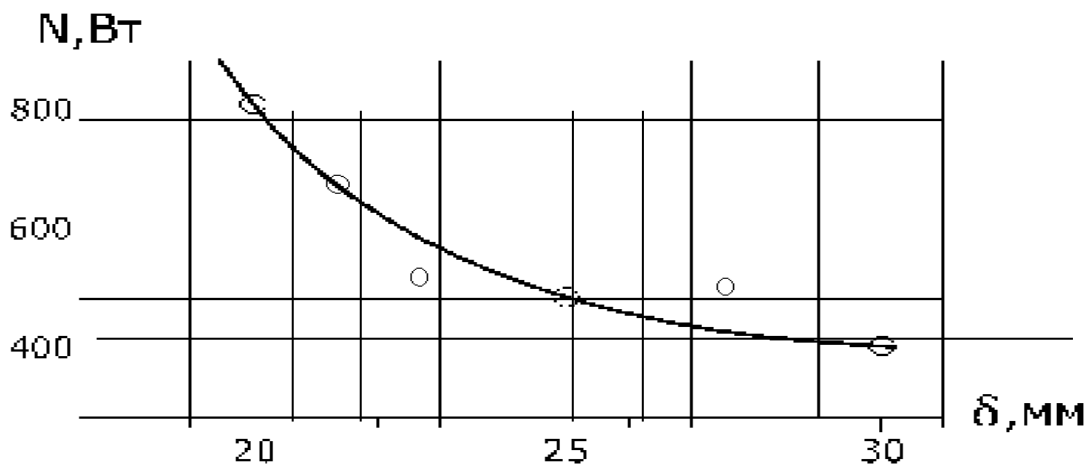


Рис. 3.8. Залежність потужності на валу машини від величини зазору

Отримана графічна залежність потужності від значення зазору між барабаном та пластифікатором наведена на рис.3.8. Це означає, що найменша кількість споживання потужності ймовірна при зазорах 25÷30 мм. Це пояснюється тим, що дотичні та нормальні напруження, гідродинамічний тиск забезпечуються оптимальними значеннями. За таких умов змішування, потужність становитиме 510÷420 Вт. Графік зміни потужності за весь цикл процесу (рис 3.9).

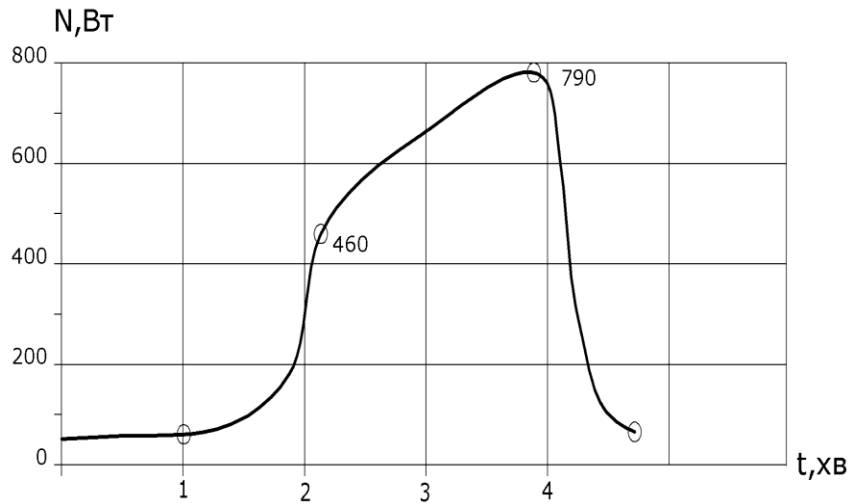


Рис. 3.9. Повний робочий цикл машини. Зміна потужності на валу машини протягом процесу

З графіка залежності чітко бачимо, що найбільшій потужності на валу потребує етап пластифікації, що починається з другої хвилини і триває до вивантаження готового тіста. Тут миттєва потужність на валу машини 460...790 Вт.

Розподіл тиску при пластифікації тіста для трьох випадків положення пластифікатора визначено програмним комплексом (рис. 3.10). В області подавання тіста гідродинамічний тиск становить 0.975 кПа. Поступово починає зростати по довжині профільного каналу місильної камери. При пластифікації проходить активне стиснення тіста і зростає до 0.1 МПа. Найбільше зростання гідродинамічного тиску ~ 0.115 МПа відбувається при малих зазорах. Це досить багато, що викликає значні навантаження на привод машини. Тому з певністю можна стверджувати, що основним регулятором проходження вдалого процесу замішування є поверхня пасивного вібраційного пристрою (пластифікатора) (див. додаток А4).

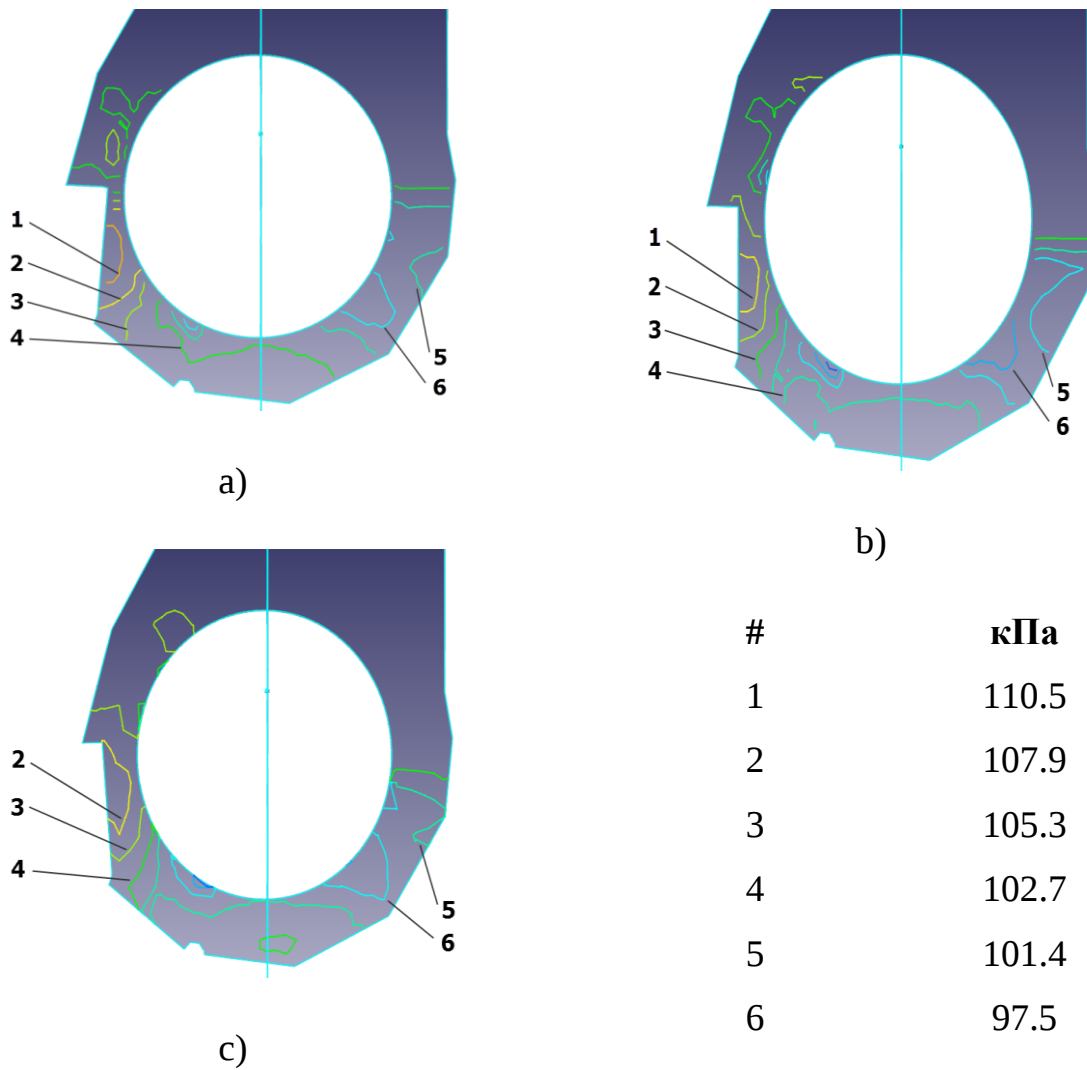


Рис. 3.10. Розподіл тиску на стискування тіста для трьох випадків положення пластифікатора: а – 20мм, б – 25мм, в – 30мм

На рис. 4.11 наведено поля розподілу дотичних напружень для трьох випадків положення пластифікатора. У випадку положення зазору 20 мм напруження відчутно зростають і досягають свого значення до 0.1МПа. Тобто майже удвічі більше, ніж при положенні 30 мм. Також бачимо, що найбільші дотичні напруження на барабані відбуваються в зоні розміщення пластифікатора, що цілком передбачувано.

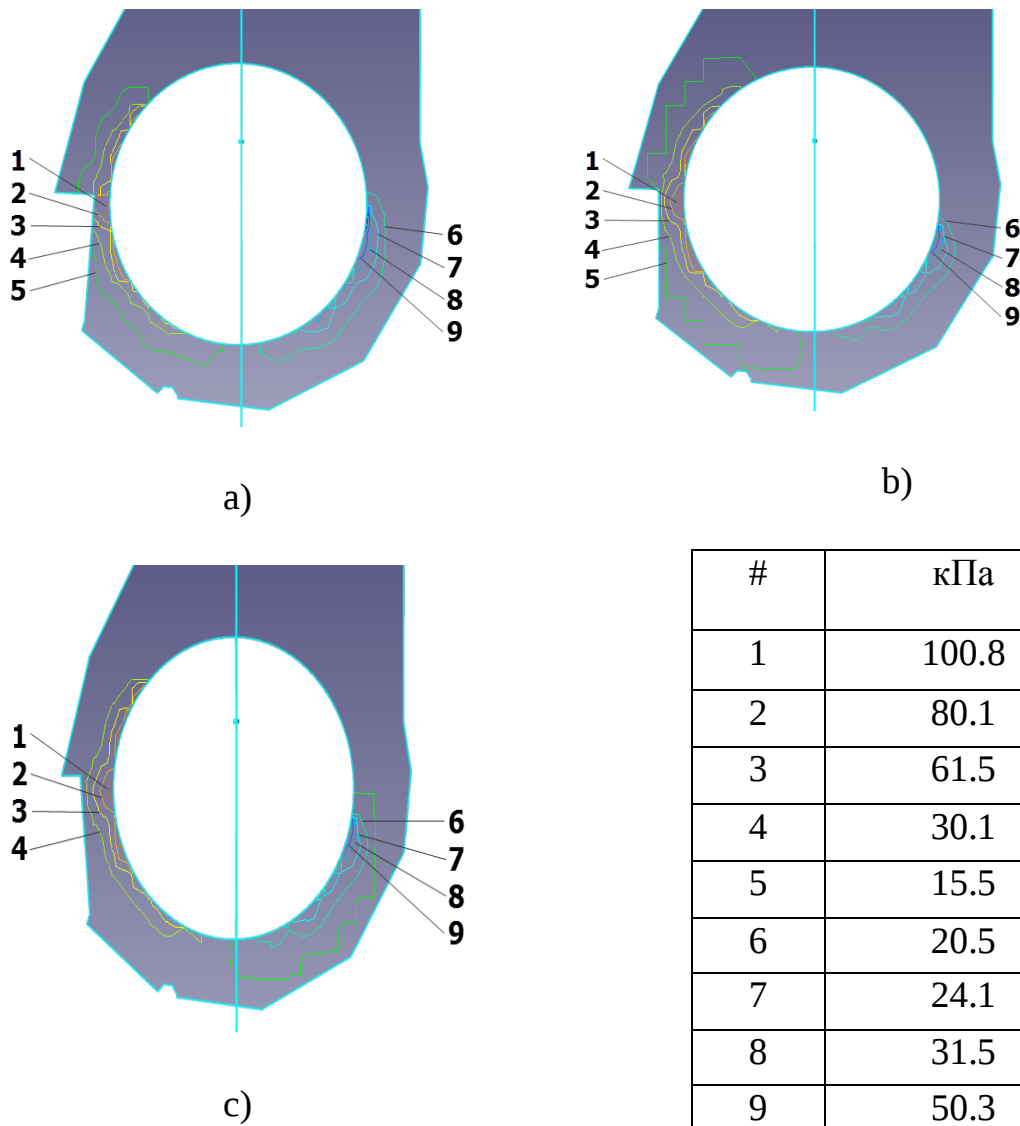


Рис. 3.11. Розподіл дотичних напружень для трьох випадків положення пластифікатора: а – 20мм, б – 25мм, в – 30мм

Найбільша деформація відбувається в області пластифікатора (рис.3.12). Значення деформацій $\epsilon < 1$ характерні для ділянок, де тісто розтягується (права частина робочої камери, в якій втягується тісто). В області пластифікатора тісто зазнає стискування, що відповідає значенням деформації $\epsilon > 1$. Аналіз розподілу деформацій свідчить, що місильний барабан не дуже впливає на утворююче тісто, а плавно розподіляє деформації у робочій камері. З моделювання (рис. 3.12) бачимо, що в місильній камері є ділянки, де відсутні деформації. Цей

факт можна пояснити тим, що тісто надходить із ділянки «релаксації» до ділянки «інтенсивного змішування» під дією сил гравітації, адгезії і сил тертя.

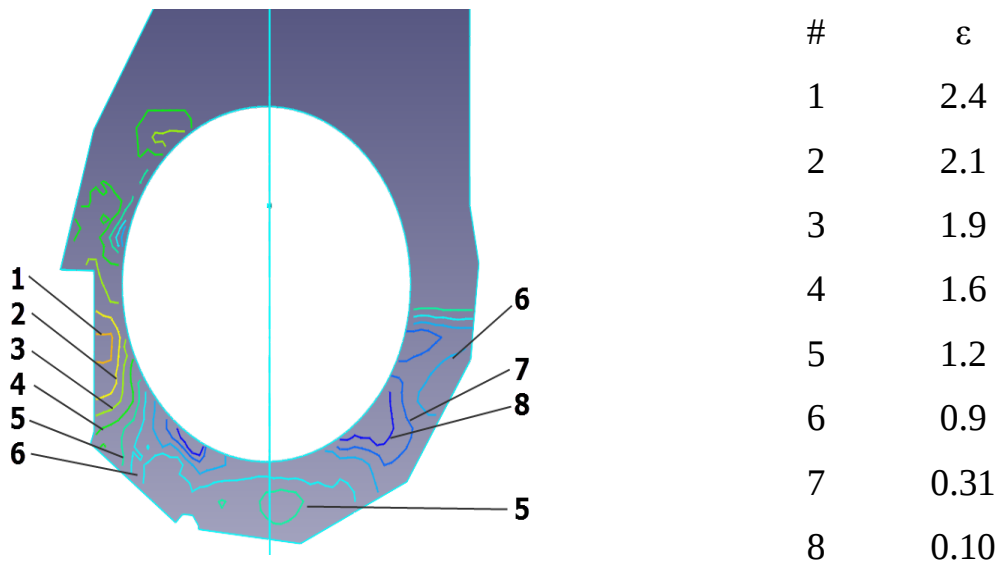


Рис.3.12. Поле розподілу деформацій

3.4.1. Визначення гідродинамічних режимів руху змішуваних компонентів

Одним із показників, що характеризує найвагоміші режими інтенсивності взаємодії фаз, є напрямки руху течії змішуваних компонентів. Величина напірної та зсувної течії, викликана місильним барабаном, характеризує енергозатрати на процес змішування. На відміну від конструктивних особливостей інших тістомісильних машин, в безлопатевій тістомісильній машині дискретної дії течія має складнішу природу і визначається більшою кількістю чинників.

Тут фази взаємодіють під впливом зовнішніх силових полів, зумовлених перемішуванням у зваженому стані, дією великої поверхні місильного барабан в змінних зазорах багатогранної місильної камери. Завдяки своїй в'язкості, компоненти мають рух менший, ніж місильний барабан. Таким чином, місильний барабан має велику швидкість відносно компонентів, про що свідчить векторний рух розподілу швидкостей (рис. 3.13). З картини розподілу

швидкостей можна помітити область підвищеної швидкості на периметрі місильного барабана, в зоні нагнітання суміші компонентів і в зоні виходу після пластифікаційної поверхні. Ця швидкість становить 36 см/сек.

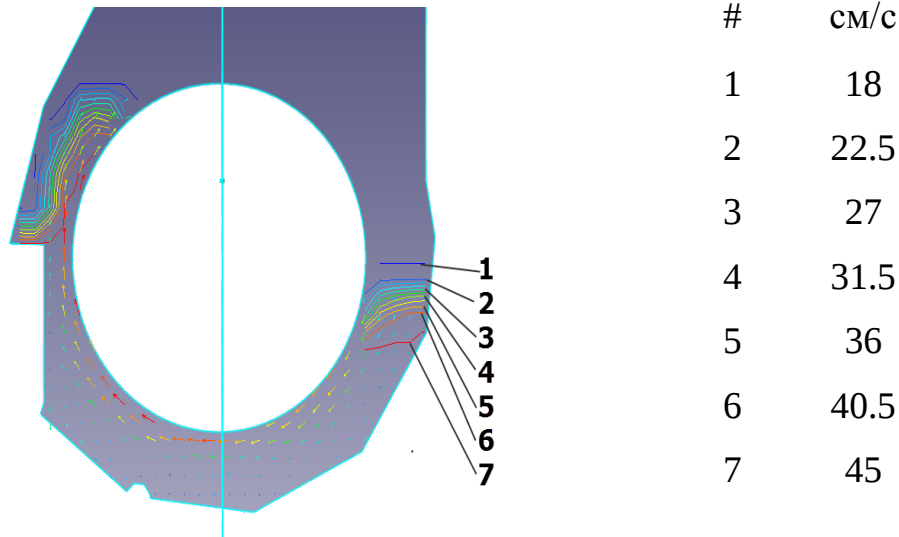


Рис. 3.13. Розподіл швидкостей

З наближенням до пластифікатора швидкість компонентів збільшується і досягає майже 45 см/с. У граничному шарі на поверхні місильного барабана рух компонентів дуже значний. Він сприяє утворенню маси тіста, що внаслідок пружних властивостей створює сприятливі умови для виникнення циркуляційних вихрів.

Особливість конструкції місильної камери дозволяє впливати на зміну швидкості компонентів на радіусі місильного барабана (внаслідок зміни площі перетину). Відповідно максимальна швидкість досягається на внутрішньому радіусі, причому цей період є найбільш критичним. У цьому періоді при максимальній швидкості компонентів діє мінімальна відцентрова сила.

З комп'ютерного моделювання чітко виділяється зона, де рух тіста майже відсутній. Найбільший контакт фаз компонентів відбувається на поверхні місильного барабана, що створює значний градієнт швидкості руху. Такий контакт сприяє місильному барабанові розподілити отримані навантаження в період пластифікації тіста. Слід відзначити і той факт, що виділена кількість тепла при інтенсивному замішуванні каталізується в навколишнє середовище,

так як місильний барабан є латунний. Тому тісто має завжди сталу температуру, а це сприяє прискоренню його утворення й досягнення оптимальних фізичних властивостей. Отриману інформацію можна використовувати при конструюванні обладнання для уникнення застійних ділянок.

Таким чином, використання даних методик експериментів дозволяє проаналізувати деформаційний стан тіста при замішуванні. За допомогою програмного комплексу можна визначити раціональні параметри геометрії машини та положення основних конструктивних елементів.

3.5. Теоретична модель обчислення затрат потужності під час замішування тіста

Для обчислення затрат потужності розглянемо основні сили, які діють на місильний барабан. На кожен нескінченно малий елемент площі dS барабана діють дві сили: 1) гідродинамічного опору замішуваного тіста; 2) сила тертя тіста. Ці сили виникають у результаті дії місильного барабана на суміш компонентів, які взаємодіють з поверхнею робочої камери протягом усього процесу тістоутворення.

Гідродинамічний опір відбувається на перших двох стадіях замішування. Цей період триває до моменту утворення маси тіста (пластичної). Після чого починають діяти сили тертя і в період пластифікації тіста.

Тому потужність, необхідну для обертання барабана, можна визначити із залежності

$$N = \int_S v (dF_c + dF_{mp}), \quad (3.22)$$

де N – затрачена потужність, Вт; v – швидкість переміщення суміші, м/с; dF_c – сила опору, на нескінченно малий елемент площі барабана, Н; dF_{mp} – сила тертя, на нескінченно малий елемент площі барабана, Н.

Сила гідродинамічного опору дорівнює

$$dF_c = \lambda_1 \frac{\rho v^2}{2} dS, \quad (3.23)$$

де S – елемент площі, м^2 ; ρ – густина суміші, кг/м^3 ; λ_1 – безрозмірний коефіцієнт опору, що враховує характер обтікання барабана сумішшю. Цей коефіцієнт виражає вагову частку замішаних компонентів. Сила гідродинамічного опору значно менша за силу тертя; v – швидкість руху суміші компонентів.

Силу тертя можна обчислити на основі рівняння Гершеля

$$dF_{mp} = (\sigma_0 + k\gamma^{1-m}) dS, \quad (3.24)$$

де σ_0 – гранична напруга зсуву, Па ; k – коефіцієнт консистенції; m – темп руйнування структури; γ – швидкість зсуву, с^{-1} .

Коефіцієнт консистенції

$$k = B_0 \gamma^m, \quad (3.25)$$

де B_0 – ефективна в'язкість за одиничної швидкості зсуву, $\text{Па} \cdot \text{с}$.

Тоді рівняння (3.24) набуває вигляду

$$dF_{mp} = (\sigma_0 + B_0 \gamma) dS. \quad (3.26)$$

Елемент площі барабана

$$dS = b \cdot dl, \quad (3.27)$$

де b – ширина місильного барабана, м ; dl – елемент довжини кола з радіусом барабана (рис. 3.14).

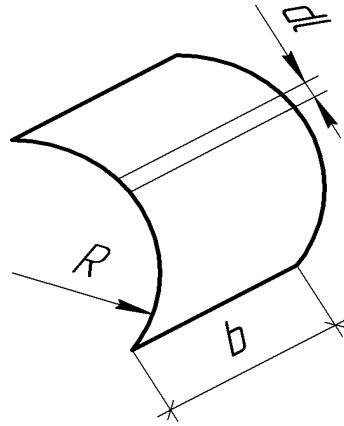


Рис. 3.14. Розрахункова схема місильного барабана

Врахуємо, що лінійна і кутова швидкості переміщення пов'язані співвідношенням

$$v = 2\pi Rn, \quad (3.28)$$

де n – частота обертання, с^{-1} ; R – радіус барабана, м.

Швидкість зсуву пропорційна частоті обертання барабану тому перепишемо рівняння (3.22) так:

$$dF_{mp} = (\sigma_0 + \lambda_2 B_0 n) dS, \quad (3.29)$$

де λ_2 – безрозмірний коефіцієнт тертя, що враховує характер обтікання поверхні місильного барабана сумішшю.

З урахуванням цього вираз (3.22) набуває вигляду

$$N = \int_0^{2\pi R} 2\pi Rn \left(\lambda_1 \frac{\rho (2\pi Rn)^2}{2} + \sigma_0 + \lambda_2 B_0 n \right) b dl, \quad (3.30)$$

Інтегруючи (3.30), отримуємо

$$N = 8\pi^4 R^4 n^2 b \rho \lambda_1 + 4\pi^2 R^2 n b \sigma_0 + \lambda_2 B_0 n 4\pi^2 R^2 b. \quad (3.31)$$

Перепишемо (3.31) в безрозмірному вигляді

$$Eu^* = \lambda_1 + \lambda_2 Re_1^* + Ne^*, \quad (3.32)$$

де $Eu^* = \frac{N}{8\pi^4 R^4 n^2 b \rho}$ – модифікований критерій Ейлера; $Re_1^* = \frac{B_0}{2\pi^2 n R^2 \rho}$ – модифікований критерій Рейнольдса; $Ne^* = \frac{\sigma_0}{2\pi^2 R^2 n \rho}$ – модифікований критерій Ньютона.

Коефіцієнти опору λ_1, λ_2 залежать від гідродинамічної конфігурації місильної камери, гідродинаміки протікання суміші в камері. Вони є функціями критерію Рейнольдса

$$\lambda_1 = A_1 Re_2^{a_1}; \lambda_2 = A_2 Re_2^{a_2}. \quad (3.33)$$

Таким чином, з огляду на рівності (3.33), підставляючи їх у (3.32), остаточно отримуємо критеріальне рівняння обчислення потужності привода розробленої машини

$$Eu^* = A_1 Re_2^{a_1} + A_2 Re_2^{a_2} Re_1^* + Ne^*, \quad (3.34)$$

де коефіцієнти A_1, A_2, a_1, a_2 визначаються за експериментальними залежностями потужності привода машини від частоти обертання.

Відповідне регресійне рівняння щодо змінної частоти обертання, записане на підставі (3.34), можна записати так:

$$Y = C_1 n^{a_1} + C_2 n^{a_1-1}, \quad (3.35)$$

$$\text{де } Y = Eu^* - Ne^*; C_1 = A_1 \left(\frac{2\pi R b \rho}{B_0} \right)^{a_1}; C_2 = A_2 \frac{B_0}{2\pi^2 R^2 \rho} \left(\frac{2\pi R b \rho}{B_0} \right)^{a_2}.$$

У таблиці 3.1 наведено експериментальні дані залежності потужності привода розробленої тістомісильної машини від частоти обертання місильного барабана.

Таблиця 3.1

Експериментальні дані залежності потужності привода від частоти обертання

n, c^{-1}	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5	1.75	2	2.25	2.5	2.75	3
N, Bm	600	630	670	700	740	780	815	850	880	910	940

На рисунку 3.15 наведена апроксимація експериментальних даних рівнянням (3.35) за таких значень фізичних величин в отриманих рівняннях:

$$R = 0.11m; \quad b = 0.2m; \quad \rho = 1080 \frac{kg}{m^3}; \quad \sigma_0 = 265 Pa; \quad B_0 = 340. Pa \cdot c;$$

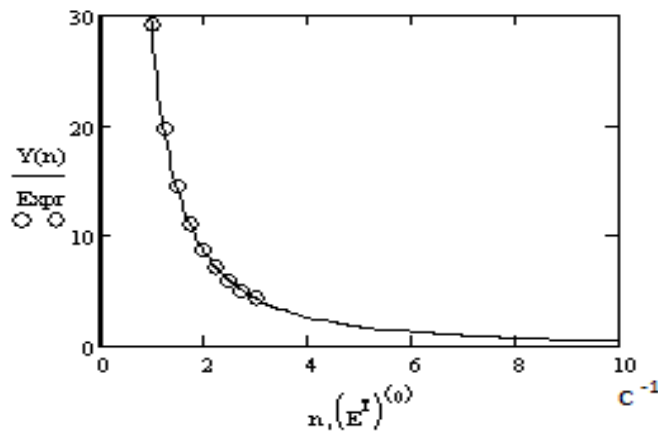


Рис. 3.15. Результати апроксимації експериментальних даних рівнянням (3.35)

Опрацювавши експериментальні дані за допомогою пакета MathCAD, отримали значення регресійних коефіцієнтів $A_1 = 3.288$; $A_2 = 6.432$; $a_1 = -1.7$; $a_2 = -0.75$.

Використовуючи (3.35) та значення коефіцієнтів A_1, A_2, a_1, a_2 , можна знайти вираз залежності потужності привода від частоти обертання

$$N(n) = \left[A_1 \left(\frac{2\pi R b \rho}{B_0} \right)^{a_1} n^{a_1} + A_2 \frac{B_0}{2\pi^2 R^2 \rho} \left(\frac{2\pi R b \rho}{B_0} \right)^{a_2} n^{a_1-1} + \frac{\sigma_0}{2\pi^2 R^2 n \rho} \right] \cdot 8\pi^4 R^4 n^2 b \rho. \quad (3.36)$$

Для знайденого виразу (3.35) будемо графік залежності (рис. 3.16).

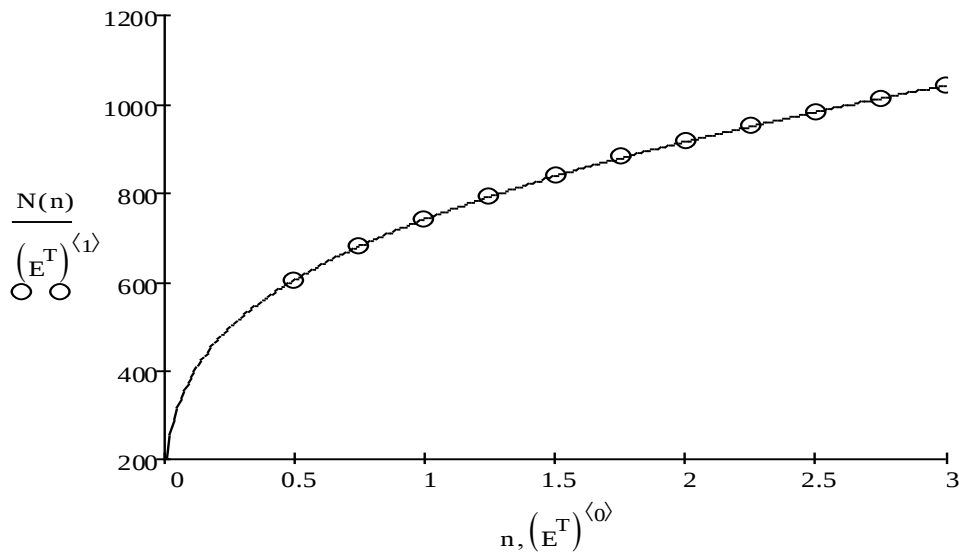


Рис. 3.16. Залежність потужності привода від частоти обертання місильного барабана.

Для даного випадку можна визначити питому роботу: $A_n=3.1$ Дж/г, та інтенсивність процесу замішування $U=0,148$ Вт.

Отриманий теоретичний розрахунок обчислення затрат потужності при відомих значеннях дії сил на місильний барабан і відповідній частоті обертання дозволяє визначити її необхідну величину для протікання процесу змішування. З'ясовано основні складові зусилля, що впливають на збільшення потужності привода місильного барабана.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ПЛАСТИФІКАЦІЇ ТІСТА З ОПТИМІЗАЦІЄЮ ПАРАМЕТРІВ

4.1. Характерні особливості пластифікації на тістомісильній машині дискретної дії

Третя стадія замішування потребує посиленого механічного впливу на компоненти, а не просто перемішування, оскільки клейковинні плівки (ламели) утворюється разом з руйнуванням молекул клейковини [3,10,24,44,73]. На останнє суттєво впливає активність деяких ферментів, а також вологість і температура утворюючого тіста. Отже, на даній стадії подрібнюється пориста структура, що на наступних етапах технологічного процесу призводить до створення дрібнопористої рівномірної будови м'якуша виробів.

Утворення тіста в робочій камері дискретної безлопатевої тістомісильної машини ґрунтується на особливо виражених процесах, що дозволяють встановити їхні закономірності й розрахувати раціональні параметри окремих операцій. Власне ґрунтовно оцінити вплив конструктивних параметрів робочої камери, поверхні пластифікатора, поверхні місильного барабана і їхніх конструктивних елементів на якість замішування. Вони полягають у точності проходження процесу та властивості тіста після пластифікації, питоме споживання енергії, надійність і тривалість роботи тістомісильної машини. Крім цього, необхідно визначити раціональні параметри поверхні пластифікатора, його розміщення до поверхні місильного барабана й оцінити рівень досконалості для процесу замішування в цілому.

Процеси на ділянці пластифікації тіста даного класу машин мають свою специфіку. Вони відбуваються циклічно за короткий період часу, що триває секунди. За цей період проходить цілий комплекс деформацій. При аналізі необхідно врахувати тільки ті деформації, що за короткий час пластифікації впливають на стан тіста і на сам процес замішування.

Бродіння в тістомісильній камері відбувається дуже коротко, тому воно не враховується. Короткотривалий тиск, механічне перемішування та транспортування в робочій камері машини впливають на структуру, фізико-механічні властивості тіста, характер наступних технологічних операцій. Вони є визначальними факторами при виборі робочих параметрів процесу пластифікації на дискретній безлопатевій тістомісильній машині.

Досі при розгляді робочих процесів замішування тіста звертали увагу здебільшого на утворення однорідної консистенції тіста при інтенсивній обробці компонентів у робочій камері машини. В даній роботі детально розглянуто черговість і тривалість дозування компонентів, суттєвий вплив параметрів барабанного місильного органу і тиску на зміну властивостей тіста.

Аналізуючи процес руху тістової маси в робочій камері під дією місильного барабана, його можна поділити на два етапи. На першому етапі під дією відцентрових сил у масі утворювального тіста виникають пружно-пластичні деформації, що з часом перетворюються в пластичні. На другому етапі відбувається течія пластичної області, яка спостерігається у середній частині місильної камери, тобто деформація в області інтенсивного замішування. Утворення пластичної деформації найбільше спостерігається і досягає свого максимального значення в області дії поверхні пластифікатора. При цьому виникають відцентрові сили інерції [58]

$$F_{in} = \rho \omega^2 r, \quad (4.1)$$

де ρ – густина маси компонентів; ω – частота обертання місильного барабана; r – плинне значення радіуса.

При взаємодії пружно-в'язкого еластичного утворюючого шматка тіста з твердою поверхнею місильного барабана і циліндричною робочою камерою виникають різні види тертя. Вони зумовлюють подвійну природу виникнення сил на реальному фрикційному майданчику пластифікатора і складаються з деформаційної й адгезійної складових. Ці складові в свою чергу суттєво

впливають на процес пластикації, що відбуваються у вигляді стискання, розкатування, закручування та формування тістової заготовки.

Наші дослідження показали, що утворені деформації на утворююче тісто носить пружно-еластичний і пластичний характер. Вони є основним фактором, що обумовлюють фізико-механічні зміни тіста. Місильний барабан визначає зовнішнє тертя, призводить до зміни майданчика фактичного контакту і фізичного рельєфу поверхні робочої камери. Геометричний рельєф поверхні пластифікатора має вирішальний вплив на утворення сил тертя і ущільнення поверхневих шарів тіста. Це повинно відбуватися при дії нормальних навантажень на робочі поверхні машини.

Аналізуючи рух утворюючого тіста в робочій камері, необхідно відзначити його закручування, перекочування між поверхнею робочої камери та місильного барабана. Одночасно при русі тіста в деяких проміжках часу виникають умови для його ковзання. Це сприяє ущільненню й вирівнюванню поверхневого шару тіста.

На майданчику контакту виявляються сили молекулярного впливу, утворюючи адгезійні зв'язки, характер яких залежить від природи замішуваної маси і розмірів контактної поверхні. При контактуванні маси тіста з місильним барабаном і місильною камерою сили адгезії беруть участь у деформуванні тіста, збільшуючи тим самим силу тертя:

$$F_{\text{тр}} = F_{\text{т}} + F_{\text{ад}}, \quad (4.2)$$

де $F_{\text{т}}$ – деформаційна складова сили тертя, зумовлена деформуванням поверхневих шарів тіста; $F_{\text{ад}}$ – адгезійна складова сили тертя, обумовлена молекулярною взаємодією в зоні фактичного контакту.

4.1.1. Процес утворення тіста

Грудочки тіста потрапляючи до нижньої частини місильної камери при дії місильного барабана ущільнюються у велику суцільну масу, що надходить на

процес пластифікації. На початковій стадії пластифікації виявити будь – які закономірності даного процесу неможливо. Коли шматки тіста набувають форму суцільного шматка, тоді можна процес пластифікації розглядати як процес вальцювання і закатування пружно-в'язкого-еластичного шматка тіста на несучій поверхні місильного барабана і шарнірно - нерухомій поверхні пластикатора. За час $\Delta\tau$ місильний барабан переміститься від положення I до положення II (рис. 4.1). Під дією прикладеної сили Q зминається шар тіста на глибину δ :

$$\delta = R - \sqrt{R^2 - r^2}, \quad (4.3)$$

де R – радіус місильної камери та шару тіста; r – радіус, утворений в процесі пластифікації шару тіста.

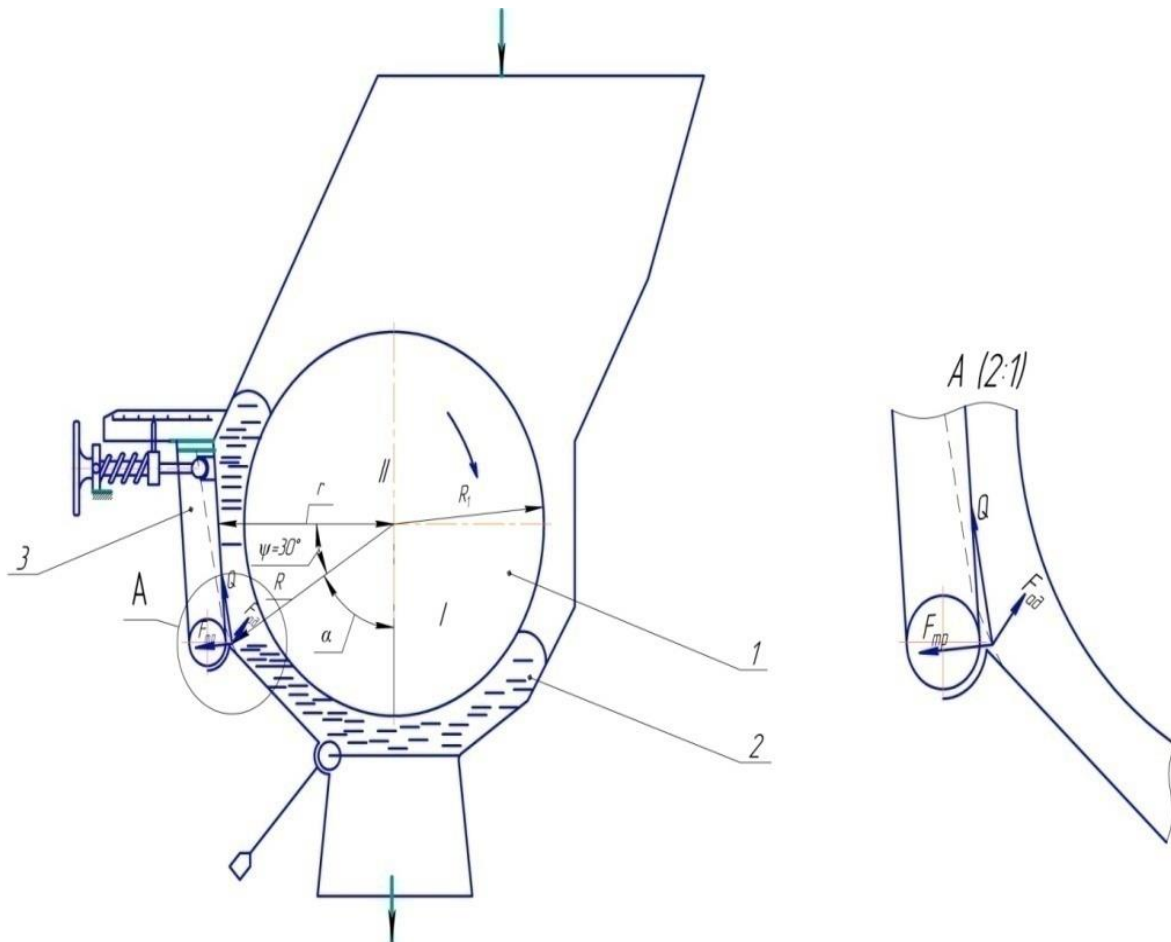


Рис. 4.1. Розподіл діючих сил на майданчику контакту: 1. – місильний барабан; 2. – тісто; 3. – пластикатор

На ділянці контакту утворюється майданчик контакту, що для місильного барабана можна визначити рівнянням

$$S_0 = B \cdot l_3 = B \cdot \frac{2\pi \cdot R_1(\alpha + \psi)}{360^\circ}; \quad (4.4)$$

– для пластифікатора:

$$S_{\pi} = B \cdot \frac{2\pi \cdot \psi}{360^\circ}. \quad (4.5)$$

У процесі вимушеної течії утворюючого шару тіста відбувається ковзання по внутрішній поверхні місильної камери з швидкістю v . При стисканні поверхневого шару і його ковзанні на ділянці пластифікації, тісто ущільнюється і структура вирівнюється. На основі таких дій тісто набуває підвищеної газо- і формоутримувальної здатності. Відбувається проникнення молекул води (дифузії) всередину частинок борошна, що сприяє набухання та збільшенню об'єму тіста. За один цикл пластифікації тіста утворюється пояс зминання довжиною

$$l_3 = \frac{2\pi \cdot R_1(\alpha + \psi)}{360^\circ}. \quad (4.6)$$

Для рівномірного ущільнення й пересування шматка тіста поверхнею пластифікатора служить регулятор його поверхні, що регулює і згладжує навантаження з боку тіста даної зони І. Тому швидкість течії переміщення шматка тіста поверхнею місильного барабана буде в кілька разів нижчою, ніж поверхнею пластифікатора. Ковзання на поверхні місильного барабана можна не враховувати ще й тому, що поверхня має нанесені рихлі. З урахуванням ковзання φ фактична швидкість течії переміщення шматка тіста по поверхні барабана

$$v_B = v \cdot \varphi. \quad (4.7)$$

Сила тертя F_{π} спрямована в бік, протилежний ковзанню, а в зоні швидкостей сила тертя з збільшенням швидкості зменшується. Крім того,

зменшення тривалості контакту призводить до зменшення дії сили тертя. В цьому випадку силу тертя можна визначити із рівняння

$$F_{Tp} = \frac{B_3 \cdot \delta_c}{S_k \cdot \delta_N} \cdot S_c, \quad (4.8)$$

де B_3 – ширина деформаційної зони; S_k – середня площа одиничного фракційного контакту; S_c – площа контакту (сегментна) тіста

$$S_c = B \cdot \frac{2\pi R_1 (\psi + \alpha)}{360^\circ}; \quad (4.9)$$

де δ_c – опір шару тіста на зсув; δ_N – середня напруга стиснення тіста в зоні контакту.

З урахуванням деформаційної й адгезійної складових (при сковзанні пружно-в'язкого еластичного тіста) можна визначити силу тертя за рівнянням:

$$F_{Tp} = \frac{B_3 \cdot \delta_c}{S_k \cdot \delta_N} \cdot S_c \cdot (1 - \beta \cdot v_B), \quad (4.10)$$

$$\text{де } S_k = B \cdot \frac{2\pi \cdot R_1 (\psi + \alpha)}{360^\circ}; \quad (4.11)$$

β – коефіцієнт, що враховує зменшення сили тертя зі збільшенням швидкості руху.

З аналізу виконаних теоретичних дослідів (див. розділ 3), [106,128,132] бачимо, що тісто утворюється без великих сил тертя, оскільки процес відбувається на поверхні місильного барабана і частково в «камері інтенсивного перемішування». Утворювальна маса тіста, проходячи через пластифікатор, зумовлює великі сили тертя в результаті його опору, що переважно залежить від поверхні контакту маси тіста із поверхнею місильного барабана й поверхнею місильної камери. Одночасно маса тіста діє по довжині профільного каналу, де величина цієї сили залежить від деформації. Очевидно параметрами процесу є конструктивні особливості пластифікатора, що регулює величину зусилля для деформування тіста і переміщення його по формівному каналу.

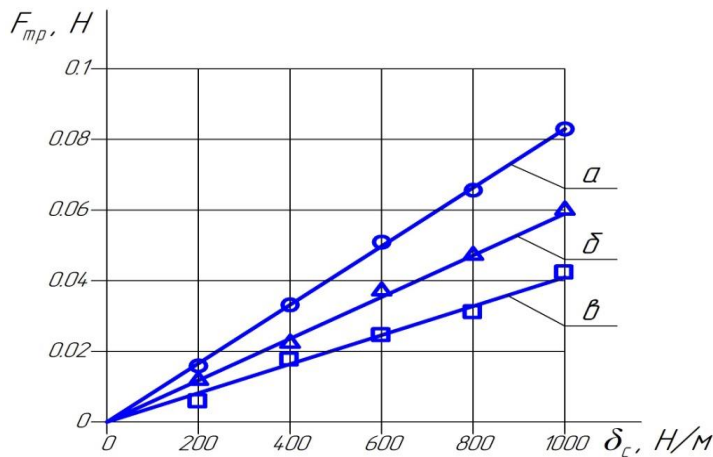


Рис. 4.2. Залежність сили тертя від опору шару тіста на зсув при різних значеннях зазору: а – $\delta = 20$ мм; б – $\delta = 25$ мм; в – $\delta = 30$ мм

На рисунку 4.2 показано графічні залежності $F_{тр}$ від δ_c , які наочно відображають фізичну картину тертя, що суттєво залежить від середньої напруги стиснення на ділянці контакту, регульованої розміщенням поверхні пластифікатора. Найсприятливіші умови для процесу пластифікації при $\delta = 30$ мм.

4.1.2. Вплив адгезійної стійкості на процес пластифікації тіста

З аналізу досліджень [106,128] випливає, що в перші хвилини процесу замішування утворювальна суміш контактує з усією поверхнею місильного барабана. Збільшення контактної площі відбувається за принципом (див. розділ 4.2) малорухливої еластичної деформації. Адгезійна стійкість збільшується в основному завдяки пластичній течії і визначається величиною пластичної в'язкості, що постійно змінюється в процесі замішування [15,21,27,30,31,54].

Як показали наші дослідження на експериментальній установці ДБТМ, при проходженні пластифікації тіста спостерігається відрив його шару від поверхонь пластикатора і місильного барабана. Це дозволило дослідити адгезійні властивості тіста з урахуванням відриву гладкої металевої поверхні

пластикатора площею 200 см² від рухомої поверхні місильного барабана при наявності між ними шару тіста. Поверхня пластикатора виконана із нержавійної сталі з шорсткістю поверхні ГОСТ 2789-73: 125.

Величина загальної сили адгезії дорівнює дії тиску, що утворюється в результаті взаємодії шару тіста із пластикатором. Даний шар отримує примусовий рух від місильного барабана та стиснення його при дії поверхні пластикатора за відповідні проміжки часу. Даний проміжок часу зумовлений конструктивними особливостями робочої камери та частотою обертання місильного барабана. Тому величина адгезійних сил дорівнюватиме

$$F_{ад} = \Sigma(pS) \cdot \tau, \quad (4.12)$$

Відповідно значення тиску при проходженні дільниці пластифікації

$$p = \frac{2\sigma}{\delta}, \quad (4.13)$$

де $F_{ад}$ – загальна сила адгезії, Н; p – тиск, що утворюється в результаті пластифікації тіста, Па; S – площа контакту, м²; δ – товщина тіста, м; σ – поверхневий натяг, Н/м; τ – час пластифікації.

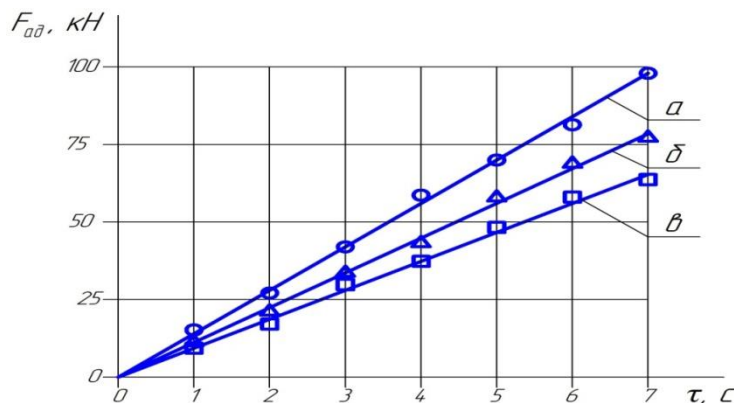


Рис. 4.3. Залежність сили адгезії тіста від тривалості пластифікації при різних значеннях величини зазору: а – $\delta = 20$ мм; б – $\delta = 25$ мм; в – $\delta = 30$ мм

Як встановлено (див. розділ 2), основним показником, що впливає на процес пластифікації тіста, є зазор між несучою поверхнею місильного барабана

і шарнірно-рухомою поверхнею пластикатора. На рис. 4.3 показана залежність адгезійної стійкості тіста від тривалості пластифікації за різних значень зазору. З поданих даних встановлено, що найвища адгезійна стійкість тіста присутня в процесі пластифікації при малій віддалі між пластикаційною поверхнею і місильним барабаном. Це можна пояснити тим, що в процесі пластифікації тісто швидше отримує великі деформації, що періодично змінюються, створюючи градієнти тисків і температури. Ці ефекти сприяють процесові, але збільшують крутний момент, споживання потужності за рахунок збільшення тертя. Збільшення тертя призводило в дослідях до нагрівання місильного барабана і піднімання температури тіста на 3-5 °С. Такий результат свідчить, що великий зазор менше впливає на адгезійну стійкість тіста, ніж малий.

У даному випадку адгезія впливає позитивно, оскільки певний проміжок часу більша частина тістової маси утримується на місильному барабані, що дозволяє зменшити допускові напруження. Поряд з цим вона негативно впливає на поверхню днища місильної камери. Як показали дослідження, якщо час та допустимі напруження зсуву затягуються, то підняття з днища місильної камери залишків непромішаного борошна внаслідок адгезійних та когезійних сил є неможливим.

З аналізу залежностей (рис. 4.3) можна стверджувати, що необхідно постійно дотримуватися адгезійної стійкості до величини $F_{ад} = 60 - 70$ кН і тривалості циклічності процесу до $\tau = 7$ с. Ці дані з'ясовують міцність адгезії в зоні відриву шару тіста від місильного барабана і відповідають значенню розміру зазору $\delta = 30$ мм (пряма в).

На адгезійні властивості тіста значно впливають тривалість τ_k , тиск p_k контакту, а також зазор, що визначає швидкість зусиль відриву v_0 . Аналізуючи виконані дослідження [160,168,169], необхідно відзначити, що тривалість контакту τ_k робочого барабана з тістом коливається до 100 сек, p_k визначається теоретично і методом дослідження (див. розділ 2, 3) з урахуванням умов деформації.

Застосувавши залежність адгезійної стійкості, запропонованої В.А. Дятловим [54,57,62,64], ми можемо прогнозувати розміщення поверхні пластикатора та час контакту тістової маси, щоб не порушувати консистенції тіста:

– від тиску контактування

$$F_{\text{ад}} = ap_{\text{к}} + b; \quad (4.14)$$

– від тривалості контактування

$$F_{\text{ад}} = c + d \ln \tau_{\text{к}}. \quad (4.15)$$

де a , b , c , d – коефіцієнти відповідно для тіста із першого сорту методом найменших квадратів: 0.32; 2286.3; 2732; 668.

З рисунка 4.4 випливає, що від адгезійної стійкості тіста залежить стискання і тривалість контактування з поверхнями і перебуває в межах 2.3–4 кН при часі 7сек. При більших значеннях проходить підвищення стійкості тіста, а це призводить до порушення технологічного процесу замішування. Тому, починаючи з першої секунди при тиску 0.2 кПа, настає відлік адгезійної стійкості тістової маси в період пластифікації. Він перебуває в межах тривалості до 7 сек та стискування тіста до 1 кПа. За цих умов інтенсивно змінюється адгезійна стійкість тіста, що суттєво впливає на динамічні навантаження місильного барабана. Тому дані параметри оптимально впливають на весь технологічний процес. Він забезпечує найбільшу взаємну рухливість компонентів, збільшуючи їх поверхневу активність, зменшує макронеоднорідність та рівномірний розподіл компонентів у масі замішуваного тіста.

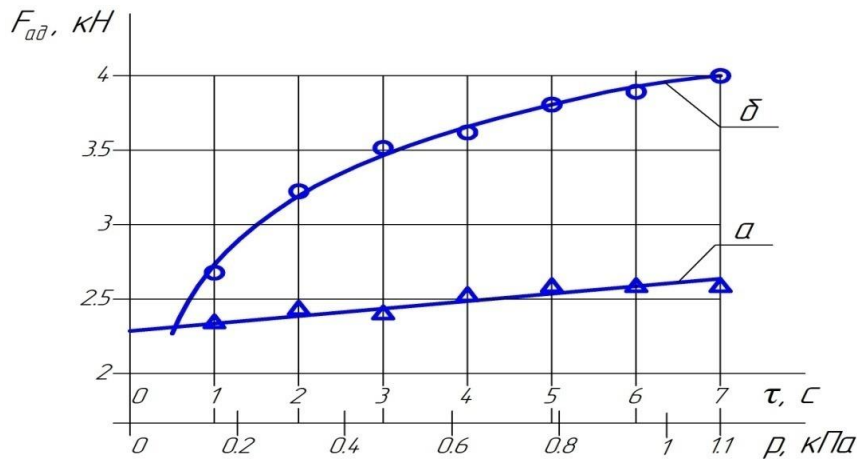


Рис. 4.4. Зміна адгезійної стійкості залежно від: а – тиску;
б – тривалості контактування

При відносному переміщенні тіста по поверхні місильного барабана, молекули тіста адсорбуються на його поверхні. З літературних джерел відомо [82], що коли сили міжмолекулярного зчеплення в утворювальному тісті стають слабшими, ніж сили адсорбції, тоді відривається шар тіста. Тому ми бачимо відрив тіста при виході його із профільного каналу. Відрив тіста відбувається на певній відстані від поверхні місильного барабана.

Залежно від реологічних властивостей, шорсткості й товщини шару тіста відрив шару відбувається різко. Це пояснюється тим, що найбільшу енергію адсорбції до металевих поверхонь має вода. При інтенсивній пластифікації тіста утворюється тонка скоринка, що затримує потрапляння вологи з шару тіста на поверхню місильного барабана. В результаті такої дії адгезія зменшується. Вологість маси тіста при цьому не змінюється. Слід зазначити, що характер розподілу вологи залежить не тільки від адсорбційних властивостей борошна, але й від рівномірності взаємного розподілу рідкої і твердої фаз у мікро- і макрооб'ємах тіста.

4.2. Дослідження фізико-механічних властивостей тіста в умовах розтягування

Для розроблення науково обґрунтованої технології процесу замішування з метою отримання тіста з відповідними властивостями необхідно знати його структурно-реологічні характеристики. Вони мають важливе значення для керування технологічним процесом замішування тіста на дискретній безлопатевій тістомісильній машині.

Процес замішування вказує на величину напружень, отриманих деформаціями з їх швидкостями і тривалістю, що призводять до трьох різновидностей деформацій у робочій камері машини. В кожній один із трьох показників деформації є постійною величиною, а другий показник – функцією третього. Таким чином, у першому випадку при постійному напруженні є деформація зсуву тіста як функція часу його деформації (τ або градієнт швидкості D); у другому при постійній швидкості деформації градієнта D є величина виникаючих при цьому внутрішніх напружень тіста, що залежить від величини його деформації; в третьому – при створених умовах постійної величини деформації тіста є його внутрішні напруження як функція часу τ (релаксація).

Результати проведених досліджень показали, що тісто в робочій камері зазнає різних деформаційних впливів. Тут відбуваються деформації стискування і зсуву, а між місильним органом і пластифікатором – деформації активного стискування та розтягування, витікання через прямокутний отвір та закручування. За таких умов для визначення оптимальних режимів деформації і процесу загалом необхідно знати фізично-механічні властивості тіста в період проходження пластифікації. Ці деформації характеризують механічні властивості в об'ємі тіста: пружність, еластичність, в'язкість, а також на його поверхні – властивості адгезії.

Згідно з розробленою конструкцією пластифікатора (див. розділ 2), що дозволяє визначити механічні властивості в умовах деформації розтягування,

проведено ряд досліджень зразків тіста у процесі пластифікації. Дослідження проводилися при різних параметрах за встановлений період. Основні параметри дослідження: зазор між пластифікатором і місильним барабаном; відповідна схема завантаження компонентів у місильну камеру; різні швидкості обертання місильного барабана; різні вологість та температура.

Для дослідження брали тісто з пшеничного борошна першого ґатунку, яке замішували в експериментальній машині згідно з трьома рецептурами (вологість $W_1 = 44.1 - 44.6\%$; $W_2 = 41.1 - 42.2\%$; $W_3 = 45.3 - 45.8\%$). Проби відбирали в процесі проходження пластифікації через оглядове вікно із загальної маси, відповідно до періодів: $\tau_1 = 30$ сек., $\tau_2 = 60$ сек., $\tau_3 = 90$ сек., що відповідало 2,5,7-й кратності деформації. Для трьох випадків досліджень температура тіста становила $29 - 30$ °C, швидкість обертання місильного барабана – 98 об/хв. Відповідно зазор між пластифікатором і місильним барабаном був виставлений для першого досліді $\delta_1 = 20$ мм; другого – $\delta_2 = 25$ мм; третього – $\delta_3 = 30$ мм. Вологість тіста визначали приладом ВНІХП-В4 (див. розділ 2).

За допомогою виготовленого спеціального пристрою (див. розділ 2) виштамповували з розкатаного шматка тіста зразок з початковою довжиною $l_0 = 100$ мм і діаметром $d_0 = 30$ мм. Розміщували його на каретці пристрою, де два кінці закріплювали за допомогою пружинних затискачів. При звільненні навантажувального механізму переміщується рухомий пружинний затискач на напрямній за допомогою роликів, що крутяться. Досліджуваний зразок розтягується на осі підтримних роликів. Переміщення триває до розриву зразка. Величина розтягування тіста визначається за шкалою. Відповідно записується діаграма на комп'ютері. Отримані дані опрацьовано з відповідною точністю до встановленого масштабу в програмі.

Для першого дослідження згідно з рецептурою брали: борошна $G_b = 3.15$ кг першого ґатунку, води $G_v = 1871$ мл, дріжджів $G_d = 100$ гр, солі $G_c = 40$ гр, олії $G_o = 40$ мл. Три зразки було відібрано відповідно до запланованого плану

експериментів, коли вологість зразків відповідала $W_1 = 44.4\%$, $W_2 = 44.5\%$, $W_3 = 44.6\%$, температура тіста 29°C . Для двох наступних досліджень було замішане тісто за рецептурою, а саме: $G_6 = 3.25$ кг першого гатунку, $G_6 = 1880$ мл і $G_6 = 3.35$ кг, $G_6 = 1920$ мл, $G_c = 50$ гр, $G_o = 40$ гр, $G_d = 120$ гр – для третього. За цими рецептурами замішувалося тісто, відповідно змінювався зазор. Отримані дані зведено у таблицю 4.1 для подальшого аналізу.

Таблиця 4.1

Характеристика вологості досліджуваних зразків

Рецептура №1								
$\delta_1 = 15 \text{ мм}$			$\delta_2 = 25 \text{ мм}$			$\delta_3 = 30 \text{ мм}$		
W_1	W_2	W_3	W_1	W_2	W_3	W_1	W_2	W_3
44.4	44.5	44.6	44.3	44.5	44.6	44.2	44.4	44.6
$t = 29 \text{ }^{\circ}\text{C}$			$t = 29 \text{ }^{\circ}\text{C}$			$t = 29 \text{ }^{\circ}\text{C}$		
Рецептура №2								
$\delta_1 = 15 \text{ мм}$			$\delta_2 = 25 \text{ мм}$			$\delta_3 = 30 \text{ мм}$		
W_1	W_2	W_3	W_1	W_2	W_3	W_1	W_2	W_3
41.1	42	42.2	41	42	42.8	41	41.8	42.2
$t = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$			$t = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$			$t = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$		
Рецептура №3								
$\delta_1 = 15 \text{ мм}$			$\delta_2 = 25 \text{ мм}$			$\delta_3 = 30 \text{ мм}$		
W_1	W_2	W_3	W_1	W_2	W_3	W_1	W_2	W_3
45.4	45.6	45.8	45.2	45.4	45.8	45.1	45.6	45.8
$t = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$			$t = 28 \text{ }^{\circ}\text{C}$			$t = 29 \text{ }^{\circ}\text{C}$		

З урахуванням вимірів ми визначили відповідні навантаження границі міцності для всіх відібраних зразків. Про зміни в зразку робили висновок за діаграмою, яку записував комп'ютер від отриманих сигналів, й опрацьовували.

На рис. 4.5 а, б, в наведено залежності для трьох рецептур при різних зазорах пластикатора. Діаграми для інших зразків, як показали проведені дослідження, аналогічні.

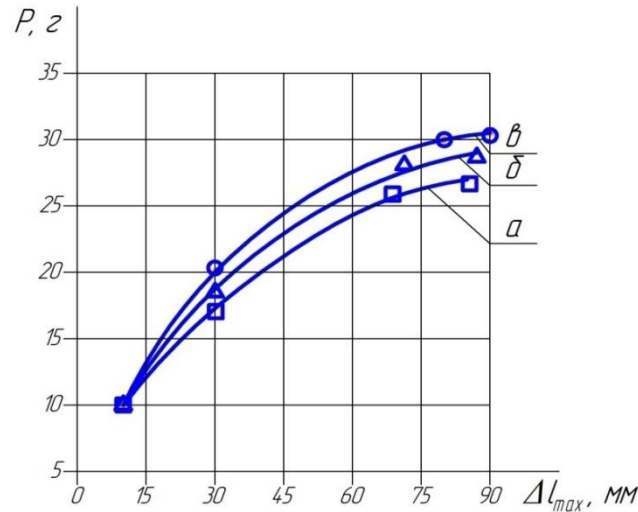


Рис. 4.5. Залежність напруги P від розтягування зразків: а - рецептура №1 і $\delta = 20$ мм; б – рецептура №2, $\delta = 25$ мм; в - рецептура №3, $\delta = 30$ мм

Знаючи величину напруги $P_{\max}$ із діаграм, розподіливши її на початкову площу попереднього перерізу зразка S_0 , отримаємо допускову пружність $\sigma_{\text{пр}}$. Величину допускової деформації ξ визначали з діаграм як відношення максимального розтягу $\Delta l_{\max}$ зразка до початкової довжини l_0 . При проходженні шматка тіста між пластикатором і місильним барабаном із зазором $\delta = 20$ мм на першому періоді відбору для першої рецептури допускова пружність і абсолютний розтяг відповідно були 29 г/см^2 і 85 мм , а для другого періоду – 30 г/см^2 і 88 мм , для третього – 30.5 г/см^2 і 90 мм . Як уже відзначалося вище, дані для двох інших рецептур майже однакові.

Судячи з початкових величин деформації і в'язкості, зразки тіста відрізнялися кількісним вмістом води та своєю пружністю. Цей період характеризується найбільшими швидкостями процесів гідролізу полімерів

борошна і низькомолекулярних з'єднань, що пластифікують тісто. Можна відзначити також, що в процесі пластифікації в тісті поступово набухають клейкоподібні білки. Даний процес збільшує пружно-еластичні деформації, зменшує величину модуля зсуву.

Завдяки відносно високій частоті обертання місильного барабан і невеликому зазорі між пластикатором і барабаном, де відбувається пластифікація тістової маси, виникає значний масообмін, що забезпечує, в першу чергу, гомогенізацію тіста і нагромадження водорозчинних речовин. Це все підтверджують дослідні дані відібраного тіста після $\tau_1 = 30$ сек пластифікації при $\delta = 20$ мм та $\delta = 25$ мм і після пластифікації $\tau_3 = 90$ сек при $\delta = 30$ мм (таблиця 4.2).

Із таблиці 4.2 бачимо, що на початковій стадії при $\tau_1 = 30$ сек. для $\delta = 20$ мм та $\delta = 25$ мм пружно-еластичні деформації значно менші, ніж при $\tau_3 = 90$ сек. Це відхилення від деформації можна пояснити структурою тіста, а також певними релаксаційними внутрішніми напруженнями при деформації. При максимальному зазорі між пластикатором і місильним барабаном, коли тиск на шматок тіста менший, ніж напруженість, допускова пружність і абсолютна величина тіста збільшуються. Цей факт наявний і при зазорі $\delta = 20$ мм, але в процесі замішування споживається багато електроенергії, і машина працює при високих динамічних навантаженнях. Таким чином, при пластифікації виділяється волога на поверхні тонкого шматка тіста, і при більшій тривалості механічної обробки структура тіста розріджується завдяки гідролізові полімерів.

Таблиця 4.2

Характеристика тіста в процесі пластифікації

№ рецептури	Характеристика тіста	Зазори між пластифікатором і місильним барабаном		
		$\delta = 20$ мм	$\delta = 25$ мм	$\delta = 30$ мм
1	$P_{\max}$, Г	32.8	29.0	44
	$\sigma_{\text{пр}}$, Г/см ²	32.8	36.9	56

Продовження таблиці 4.2

	$\Delta l_{\max}$	92	85	116
	ξ	0.92	0.85	1.16
2	$P_{\max}, \Gamma$	32.5	28	38
	$\sigma_{\text{пр}}, \Gamma/\text{см}^2$	41.6	36.2	48.4
	$\Delta l_{\max}$	92	80	105
	ξ	0.92	0.8	1.05
3	$P_{\max}, \Gamma$	33.8	30.5	39.6
	$\sigma_{\text{пр}}, \Gamma/\text{см}^2$	42	38.9	50.4
	$\Delta l_{\max}$	95	90	105
	ξ	0.95	0.9	1.05

Тісто, приготовлене за другою рецептурою (низька вологість), характеризується малою тривалістю релаксації напружень, високою пластичністю, низькою еластичністю. Ці характеристики свідчать про те, що для формування структури тіста з борошна 1-го ґатунку малої кількості води недостатньо для створення в ньому стійких когезійних зв'язків. У такій структурі тіста вода помалу проникає у внутрішні шари, тому це впливає й на якісні показники тіста, що розглядатимуться у наступних розділах.

Отже, пластифікація впливає на структуру тіста і є найбільш активним і разом з тим доступним засобом управління його властивостей. Ці впливи мають бути правильно розподілені за інтенсивністю (швидкістю деформації), тривалістю, щоб не погіршилися структура, густина і пружно-пластичні властивості тіста.

Діаграма розтягування дозволяє визначити оптимальні фізико-механічні

властивості пшеничного тіста, приготовленого за розробленою рецептурою на дискретній безлопатевій тістомісильній машині. Результати досліджень обґрунтовують доцільність процесу замішування тіста на дискретній безлопатевій тістомісильній машині при таких параметрах: тривалість пластикації (третьої стадії замішування) $\tau_3 = 90$ сек., при зазорі $\delta_3 = 25 - 30$ мм. Подальше збільшення тривалості призводить до руйнування фізико-механічних властивостей тіста, що, відповідно, впливає на параметри вивантаження з місильної камери.

Аналіз досліджень процесу в умовах одновісного розтягування тіста, що є невід’ємною складовою в дискретній безлопатевій тістомісильній машині, дозволяє науково обґрунтувати конструктивне рішення настроювання зазору між барабаном і корпусом пластикатора. З утворенням необхідного профільного каналу, вивчити та оптимізувати параметри.

4.3. Визначення релаксацій напруження тіста при замішуванні

При зміні механічних властивостей тіста важливо знати не тільки величину їх модулів пружності, еластичності і в’язкості, але й відношення в’язкості до модуля. Дане відношення виражає тривалість або швидкість релаксації внутрішніх напружень, що утворюються в процесі замішування при постійній деформації ($\xi = const$). У такому тісті величина напружень при зміні його деформації знижується з часом за законом Максвела [82]:

$$P_e = P_0 e^{-r/\theta}, \quad (4.16)$$

де P_0 – початкова напруга, яка утворена в тісті при замішуванні (деформуванні); r – тривалість витримки тіста після деформації; θ – відношення в’язкості до модуля.

Із рівняння (4.16) випливає, що напруга, утворена в процесі замішування, зменшується з часом при постійній деформації за експоненціальним законом. Таким чином, величина і швидкість зменшення напружень у замішуваному тісті залежать від часу перебування в камері «відпочинку» після циклу деформаційних впливів місильного барабана, місильної камери та пластифікатора, а також, від властивостей самого тіста. Все це дозволяє прогнозувати, що відношення в'язкості до модуля пружності, або період релаксації напружень у камері «відпочинку» має велике значення при тістоутворенні. Це сприяє в утворенні його об'єму і форми, структури м'якушки.

Тенденція структури тіста до зниження утворених в ній при деформації внутрішніх напружень характеризується періодом релаксації, що цілком залежить від швидкості деформації тіста при його утворенні. Якщо ця швидкість при тістоутворенні однакова і постійна, то тісто з більшим періодом або більшою тривалістю релаксації напружень (зумовлених великою в'язкістю або меншим модулем пружності) ліпше зберігає утворені в процесі замішування внутрішні напруження [77]. Тому при знятті зовнішніх зусиль після пластифікації, у тісті створюються деформації пружної послідовності за допомогою внутрішніх напружень. Тісто виявляє пружні властивості, властиві твердому тілові [10,77,82,85].

Як показали дослідження процесу замішування в пілотному зразку, у камері «відпочинку» є короткий період релаксації внутрішніх напружень, після чого тісто виявляє властивість пластичності (текучості). Дане тісто незалежно від величини в'язкості й модуля швидко втрачає властивість до збереження пружних внутрішніх напружень і деформується – тече із камери «відпочинку» в камеру «інтенсивного» замішування. Тому нам необхідно постійно дотримуватися складових суміші рецептури, послідовності їх дозування та дотримання циклічності деформації тіста. При сталій частоті обертання місильного барабана, але змінній частоті дозування борошна і рідких компонентів початкові пружні властивості тіста зростають через модуль пружності зсуву ($E_{п.з} \rightarrow E_0$). Збереження створених пружних напружень за період

перебування тістової маси в камері «відпочинку» зменшується, що негативно впливає на сам процес замішування. Негативність процесу виявляється і в тривалішому періоді замішування (деформацій).

Проба тіста для дослідження на релаксацію при замішуванні відбиралася безпосередньо з камери “відпочинку” на третій стадії замішування. Це обґрунтовано тим, що в цьому періоді відбуваються найбільші деформації, від яких і залежить, як сказано вище, якість тіста. Проби відбиралися для двох випадків при однаковій частоті обертання місильного барабана, але при різних частотах вібраційного дозатора борошна, швидкості витікання рідких компонентів. При цьому дотримувалися визначеного часу кожного періоду стадії замішування.



Рис. 4.6. Початок періоду релаксації тіста в камері «відпочинку»

Дослідження в такому напрямку засвідчили, що процес релаксації є контрольованим. Можна обґрунтовано визначити найсприятливіші умови для деформаційних процесів у робочій камері і найнесприятливі. Тому в дослідях було вибрано максимальну величину навантаження на тісто, що повністю визначає технологічні параметри проходження процесу пластифікації. Механічні характеристики створених напружень у тісті непорушеної і ушкодженої структури досліджували на приладі. Визначали деформації зсуву на нахиленій площині при градієнті швидкості 0.003 сек. Результати досліджень наведено в таблиці 4.3.

На двох приладах визначали умовно-миттєвий модуль зсуву E_0 . Крім цього, використовуючи експериментальні дані кривої $P(\tau)$ на рисунку 4.7, визначили тривалість (у секундах) релаксації початкових напружень τ_0 до величини $P_0 / 2.71$ (зменшення його в 2.7 раза). Далі з відношення $\tau_0 = \eta / E_0$ [77,82] визначали в'язкість частково зруйнованої структури пшеничного тіста.

При отриманих швидкостях деформації дисперсна система тіста з малим періодом релаксації напружень, завдяки малій в'язкості і великому модулю, швидко знижуватиметься напруження – до 15 с. За рахунок цього тісто швидко деформується місильним барабаном і зтягується до камери «замішування».

Таблиця 4.3

Дослідження пружно – пластичних властивостей і релаксації напружень тіста

Взірець	Дослідження тіста на приладі зсуву					Дослідження тіста на релаксометрі			
	Вологість %	Напру- ження $P \cdot 10$ Па	E_0 , 10^{-3} Па	η , 10^{-5} Па·с	η/E_0 , С	Наванта- ження, $H \cdot 10^{-2}$	E_0 10^{-3} Па	η 10^{-5} Па·с	Відносне навантажен- ня $P \cdot 10^{-2}$ Па
1	45.4	960	1.62	2.92	19	550	1.7	2.5	50
2	45.8	956	1.6	2.9	18	540	1.65	2.6	50
3	45.6	958	1.61	2.89	18.5	555	1.68	2.7	49
4	45.4	960	1.62	2.92	19	550	1.7	2.5	50
5	45.6	958	1.61	2.89	18.5	555	1.68	2.7	50

Це підтверджує те, що шляхом зміни швидкості деформації (зміна частоти, кількості) при замішуванні можна змінювати період релаксації напружень, що, в свою чергу, надає тістові пружні й пластичні властивості. Цей період відповідає частоті обертання місильного барабана 100 об/хв та тривалості дозування борошна 1 хв, рідких компонентів – 1.5 хв (рис 4.7 б).

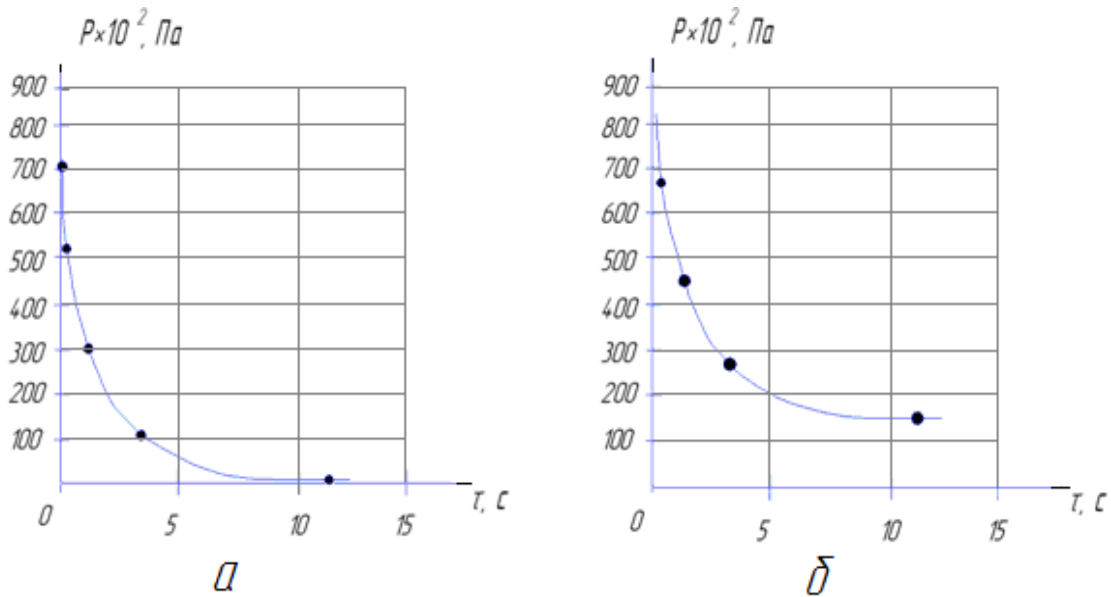


Рис. 4.7. Залежність напруження P від періоду τ при постійній деформації: а – при великих швидкостях дозування компонентів (час дозування-80сек): $G_{\text{бор}}=3,150 - 3,250$ кг; б–при оптимальних швидкостях дозування компонентів(час дозування-90 сек): $G_{\text{обр}}=3,350-3,450$ кг

Результати досліджень релаксації внутрішніх напружень методом $P(\tau)$ при $\xi = \text{const}$ обґрунтовують, що при збільшенні швидкості деформації властивості пружності тіста зростають. Одночасно за рахунок часткового руйнування структури знижується в'язкість і період релаксації напружень. Тому ці явища в подальшій роботі враховано при виборі оптимальних конструктивних складових даного класу машин для швидкісних процесів замішування тіста на третій стадії.

4.3.1. Узагальнення релаксацій напружень для тістоутворення

Основні робочі операції при замішуванні тіста: вальцювання, стиснення, випресовування, витікання відбуваються в камері машини при об'ємній деформації. На рисунку 4.8 наведено криві релаксації для тіста житньо-пшеничного з вологістю 44.2% і кислотністю 9.3°H при температурі 28°C ; пшеничного із борошна 1 гатунку з вологістю 43.8, кислотністю 2.3°H при температурі 30°C . Проби взірців відбирали в період, коли поверхня

пластифікатора доходила до максимального навантаження, яке фіксувала шкала (див. розділ 2). За рівнянням, яке відображає процес падіння напруги в тісті при постійній його деформації за часом [77], визначали період релаксації, тобто стискання тіста

$$\sigma = A_1 t^2 - B_1 t + C_1, \quad (4.17)$$

де σ – напруга (тиск) у тісті в момент часу t , Па; t – плинний час, с; A_1, B_1, C_1 – емпіричні коефіцієнти для борошна першого гатунку: $A = 0.0029937$, $B = 0.092257$, $C = 2.6912$, для житньо-пшеничного: $A = 0.0024835$, $B = 0.08494$, $C = 2.5228$.

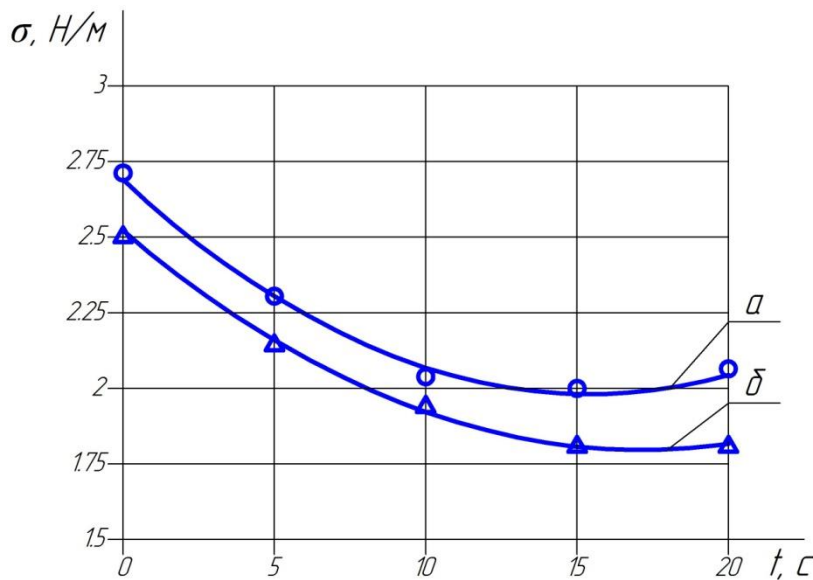


Рис. 4.8. Криві релаксації тіста із борошна: а – пшеничного 1 гатунку; б – житньо-пшеничного з валкою 30:70

З рисунка 4.8 бачимо, що напруження в тісті різко падає протягом періоду 5–10 сек з моменту виходу із пластифікатора. Потім відбувається затриманий спад напружень і після 15 сек практично вирівнюється до визначеного періоду, $\tau = 3$ сек. Аналіз кривих релаксації показав, що даний процес відбувається тим інтенсивніше, чим нижчий гатунок борошна. Особливо це видно в першому періоді релаксації, оскільки напруження спадає за перші 5 сек 0.3 Н/м, а за решту 10 сек – лише 0.4 Н/м.

Інтенсивність релаксації тіста, що в процесі пластифікації постійно перебуває в умовах всебічного стискування і деформації, залежить від початкових напружень. Чим вони більші, тим інтенсивніший процес релаксації. При початковому напруженні 2.5 Н/м для житньо-пшеничного тіста процес практично закінчується через 10-15 сек, а при 2.75 Н/м для пшеничного – через 10 сек. Збільшення тривалості релаксації призводить до зростання пружної деформації тіста, що видно з кривих релаксації. Після 15 сек починають відновлюватися напруження.

З результатів проведених досліджень встановлено, що з збільшенням швидкості нагнітання тістової маси на ділянку пластикації, інтенсивність релаксації збільшується. Враховуючи те, що процес релаксації напружень у тісті найінтенсивніше проходить у період перших секунд, а далі згасає, конструкція камери «відпочинку» великих розмірів не є виправданою. Величина пружного відновлення тіста за цей період становитиме 50 – 61 %.

Таким чином, період релаксації та величина відновлення тіста безпосередньо вказує на значення тих швидкостей деформації, вигідних для процесу пластифікації, оскільки опір деформації тістової маси при цьому найменший. Аналітичний зв'язок усіх досліджень змінних факторів (температура і вологість тіста, тиск у процесі пластифікації) дуже ускладнює весь процес замішування. Отримані результати в процесі пластичної деформації в умовах релаксації напружень у камері «відпочинку» свідчать про зниження пружних і збільшення пластичних властивостей тіста після кожного циклу пластикації. В свою чергу, зростання пластичності тіста сприяє зменшенню енергії, затрачуваної на цю стадію і скороченню тривалості замішування. Оптимальний результат, який відображає якісні параметри релаксації тіста 10–12 сек є у рецептурі №1 (таблиця 4.1) при зазорі 30 мм і частоті обертання місильного барабана 100 об/хв.

З отриманих даних встановлено можливість керування та стабілізації структури тіста шляхом механічної дії місильного барабана та зазору між ним і пластифікатором. Це впливає на структуру утворення тіста та утримання

виділеного при бродінні вуглекислого газу. Цей керований процес релаксації сприяє фізико-механічним властивостям хлібного м'якуша та об'ємному виходу і формі подового хліба (H/D).

4.4. Дослідження кінетики деформації тіста на стадії пластифікації

У багатьох технологічних машинах тісто нагнітається валками. Оскільки основну функцію процесу замішування виконує місильний барабан, то необхідно знати залежність параметрів, що характеризують подачу тіста. Показники роботи барабана: продуктивність подавання (Π), коефіцієнт подавання (K), крутний момент на валу барабана (M).

Дослідження проводилися з урахуванням конструктивних особливостей машини. Кут, який відповідає дузі барабана, утворений з моменту подавання шматка тіста до камери «інтенсивного» замішування – це кут живлення, а кут, що відповідає дузі барабана, утворений між початком поверхні пластикатора і кінцем його поверхні – кут нагнітання (див. рис. 4.1).

У процесі замішування компоненти рухаються за допомогою місильного барабана профільним каналом місильної камери. Такий процес сприяє оптимальному утворенню тістової маси між рухомою і нерухомою поверхнями. При цьому створюється «м'яка» розхідно-напорна характеристика. Тому для даного класу машин продуктивність, процес пластифікації тіста залежить від стабільного живлення масою тіста. Порушення даного процесу різко знижує продуктивність.

Зазор між поверхнею пластикатора і місильним барабаном виставляли: - від 20 мм до 30 мм. На рисунку 4.9 наведено графік залежності продуктивності нагнітання тіста Π (відповідно рівняння 4.18) від частоти обертання місильного барабана при різних значеннях зазору.

$$\Pi = 2\pi \cdot R_1 \cdot B \cdot \delta \cdot n \cdot \rho \cdot K, \quad (4.18)$$

де R_1 – радіус місильного барабана; B – ширина деформаційної зони; δ – величина зазору; n – частота обертання місильного барабана; ρ – густина тіста; K – коефіцієнт стискання.

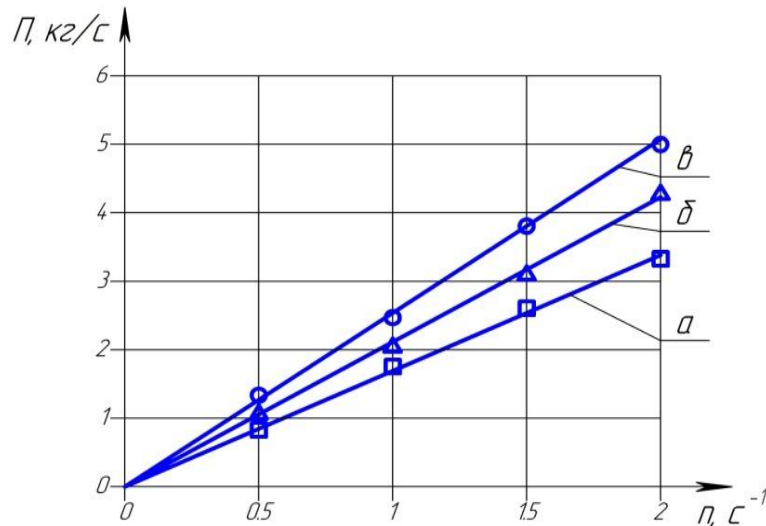


Рис. 4.9. Залежність продуктивності нагнітання тіста від його частоти обертання при різних значеннях зазору:

а – $\delta = 20$ мм; б – $\delta = 25$ мм; в – $\delta = 30$ мм

З рисунка 4.9 бачимо, що з збільшенням зазору між поверхнею пластикатора і поверхнею місильного барабана збільшується продуктивність. Продуктивність відіграє важливу роль у всьому процесі замішування. Таким чином, при відповідному зазорі 2.5–3 см з'являються найліпші показники роботи: тривалість замішування, споживання електроенергії, якість тіста, продуктивність.

У процесі замішування постійно змінюються властивості тіста, відношення фаз і їх склад. При обчисленнях процесу третьої стадії замішування й аналізі її робочих процесів нас цікавлять властивості тіста як у процесі пластикації, так і в наступних процесах у виробничих умовах.

При зсуві шари деформованого утворювального тіста зміщуються з різною інтенсивністю. Відносна швидкість руху шарів ще не визначає швидкості зсуву, що залежить від відстані між шарами. Тому в процесі третьої стадії замішування важливу роль відіграватиме лінійна швидкість руху деформівного тіста й щілина

між деформаційною рухомою поверхнею пластикатора і нерухомою поверхнею місильного барабана. Із досліджень випливає, що процес тістоутворення швидше починається при зазорі $\delta = 20$ мм, потім при $\delta = 25$ мм, та з деяким запізненням при $\delta = 30$ мм. При $\delta = 20$ мм процес пластифікації тіста настає швидко, але з великим крутним моментом на валу, що призводить до більшого споживання електроенергії й великих навантажень на місильний барабан (див. розділ 3). При цьому тісто не нагрівається. Тривалість замішування в даному випадку триває 3.5 – 4 хв.

Дослідження кінетики деформації на початковому періоді утворення тіста виявили, що в певний момент часу надається сила P , у результаті виникає миттєва деформація, пропорційна прикладеній силі P . Внаслідок пластифікації до деформації додається наступна деформація, також пропорційна силі P і певному часові. Даний процес триває до завершення циклу пластифікації – отримання однорідної консистенції.

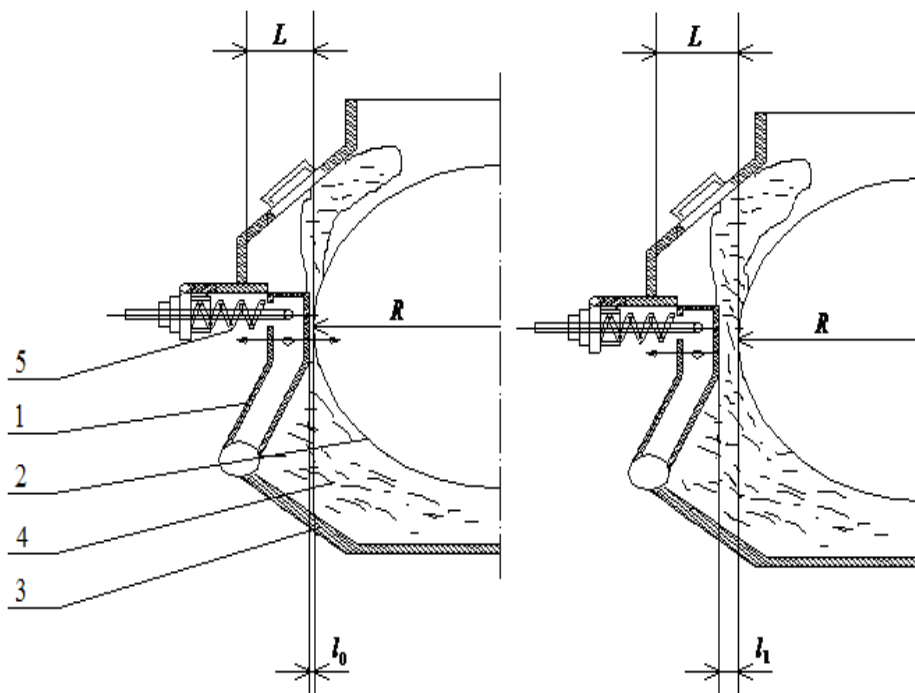


Рис. 4.10. Розміщення поверхні пластикатора і штока при визначенні пружних властивостей тіста: 1 – консистометр; 2 – місильний барабан; 3 – корпус тістомісильної машини; 4 – тісто; 5 – пристрій

При визначенні пружних властивостей тіста в період проходження пластифікації вимірювали рух штока на закріпленій шкалі (див. рис. 4.10). Рух виходу штока в процесі пластифікації фіксувався показом мірної лінійки l_0 . Під дією сили пружини шток повертається у попереднє положення. При повторному проходженні процесу пластифікації тіста, шток займає інше положення, що свідчить про залишкову деформацію в тісті. Пружні властивості тіста характеризуються своєю абсолютною деформацією стискування $l_1 - l_0$, тобто різницею між теперішнім показом і початковим. Чим більша ця різниця, тим тісто більш пружне. При цьому особливий інтерес представляє відносна зміна деформації ε (у %) і питома робота A .

Відносну деформацію тіста визначали, виходячи з початкового та кінцевого значення стрілки на пластикаторі (на початку і в кінці пластифікації). Абсолютна деформація Δl (в Н), а також ε_0 , визначаються за формулами

$$\Delta l = l_{i+1} - l_i, \quad (4.19)$$

$$\varepsilon_0 = -\frac{l_i - \Delta l}{L - l_i} \cdot 100. \quad (4.20)$$

Коефіцієнт повзучості тіста визначали за формулою

$$k_T = \frac{l_K}{l_n},$$

де l_K – абсолютне значення стискуваності тіста в кінці пластикації; l_n – абсолютне значення стискуваності тіста спочатку пластифікації.

Крім миттєвої пружності, тісто проявляє свою високу пластичність, що збільшується при пластифікації. Ці властивості проявлені у пластичній деформації $\varepsilon_{e.n.}$, що являються різницею між максимальною досягнутою деформацією і діючим на тісто напруженням з боку поверхні пластикатора, що зрівноважені внутрішнім опором структури тіста. Після пластифікації, тобто знятті зовнішніх напружень з тіста, миттєво-пружна деформація ε_0 зникає і відбувається релаксація (спад) високопластичної деформації $\varepsilon_{e.n.}$, що триває до

15 сек. Ці перепади деформацій сприяють високій пластичності тіста, що відіграє важливу роль у подальших технологічних процесах. Пластичні деформації тіста визначали за формулою [72]:

$$\varepsilon_{\text{в.п.}} = \varepsilon_{\text{м}} (1 - e^{-\tau/\theta}),$$

де e – основа натурального логарифма; τ – тривалість процесу деформації; θ – тривалість періоду релаксації деформації за період перебування тіста в камері «відпочинку».

Обчислені значення наведено графічно на рис. 4.11.

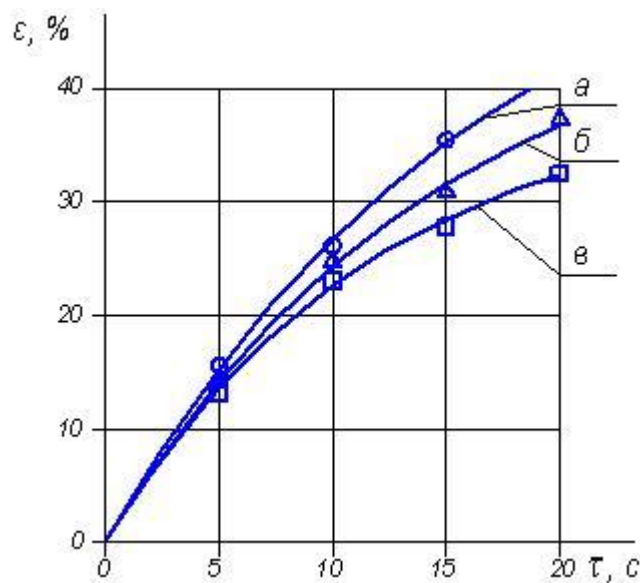


Рис. 4.11. Залежність зміни пластичної деформації від тривалості процесу при різних значеннях зазору: а – $\delta = 20$ мм; б – $\delta = 25$ мм; в – $\delta = 30$ мм

Отримані результати засвідчують, що процес деформації найплавніший при замішуванні тіста із зазором $\delta=30$ мм. Дане тісто більш пластичне, а коефіцієнт повзучості плавно збільшується протягом усього періоду пластикації. Обчислення показали, що на початку пластифікації тіста при зазорі $d=20$ мм коефіцієнт повзучості $K=1,2$, а при $d=30$ мм – $K=0,83$. Кінцеві результати при вибраних зазорах $K=2,5$ і $K=1,6$.

Грунтуючись на вимогах механізму інтенсифікації процесу замішування при збільшенні деформації (20 мм), тістоутворення в профільному каналі не встигає відбутися повністю – зменшується, а модуль пружно-пластичних

властивостей тіста збільшується. Таким чином, пружність тіста виявляється в умовах оптимальної швидкості деформації, що залежить від періоду релаксації.

При рухомій поверхні пластикатора виконують роботу пружні сили:

$$A = F \cdot (l_1 - l_0). \quad (4.21)$$

Питому роботу 1 кг тіста (в Дж) можна обчислити за формулою:

$$A_{\text{п}} = \frac{A}{m_{\text{сп}} \cdot 10^3}, \quad (4.22)$$

де $m_{\text{сп}}$ – середня маса тіста між поверхнею пластикатора і поверхнею місильного барабана, г

$$m_{\text{сп}} = \frac{V}{\nu}, \quad (4.23)$$

де ν – питомий об'єм; V – об'єм камери.

Обґрунтовуючи результати досліджень, побудуємо кінетику деформації на ділянці пластифікації. Характер деформації тіста за один цикл пластифікації наведено на рисунку 4.12, з якого видно, що тісто за один цикл отримує напруження, більші від допустових напружень текучості $\sigma > \sigma_{\text{т}}$ або $\tau > \tau_{\text{т}}$. Як наслідок, виникає пружна деформація $\varepsilon_0 = \frac{\sigma}{E}$, де E є миттєвим модулем пружної деформації. Подальший процес пластифікації сприяє розвитку деформації до визначеного значення, що визначає готовність консистенції тіста.

На 90-й секунді процесу замішування відбуваються перші деформації, що відповідають зусиллям, прикладених тістом до поверхні пластикатора. Ці зусилля короткотривалі – до 7сек. і дорівнюють 960Па. Протягом цього періоду деформація розвивається за кривою АВ. Криволінійність ділянки АВ виявляється внаслідок отримання тістом пружних і пластичних деформацій у результаті витікання тіста через профільний канал. Однакову пружність на зсув утворюване тісто виявляє тільки в перший, дуже короткий період дії сили ($\tau = 3 \text{ с}$)

що й характеризується миттєвим модулем. Цей модуль відповідає власній пружній деформації ε_0 , що розвивається після прикладання напруги зсуву і зростає пропорційно прикладеній напрузі.

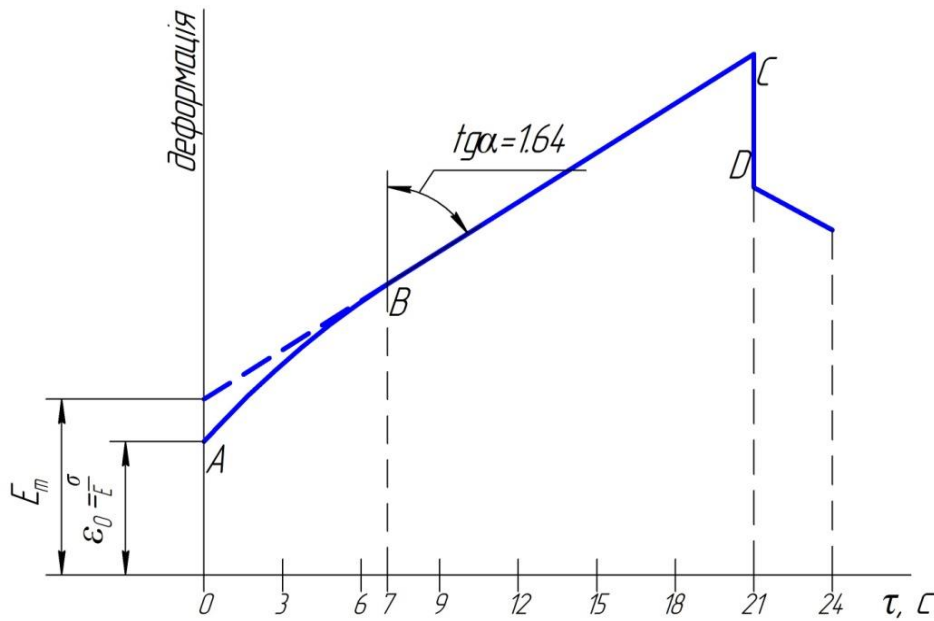


Рис. 4.12. Крива кінетики деформації

У камері «відпочинку» внаслідок легкорухливості тіста отримана напруга «розсмоктується» і плинність тіста сприяє подальшому процесові змішування. Як уже вказувалося (див. 4.3), частина отриманої деформації в процесі пластифікації розвивається в часі й набирає заданого значення на $\tau = 15$ сек. Цьому значенню відповідає нахилений відрізок BC.

Значення точки C свідчить про завершення процесу релаксації й зняття напруження із маси тіста, при цьому зменшується частина пружної деформації $CD = OA = \frac{\sigma}{E}$. З камери «відпочинку» місильний барабан затягує масу тіста до профільного каналу робочої камери і подає на пластифікацію. Цикл деформації триває $\tau = 21 - 23$ с, а весь період пластифікації – до 90 сек. Після завершення пластифікації тіста відбувається процес вивантаження із місильної камери. У вивантаженому тісті протягом $\tau = 10 - 15$ хв відновлюються пружні деформації, тобто збільшується об'єм. Це певним чином негативно впливає на подальший

технологічний процес виготовлення виробу. Тому нашими дослідженнями встановлено, що після 10 хв відновлення тістову масу необхідно перемішати.

4.5. Дослідження стискання тіста

З літературних джерел відомо [24,63,102], що при стискуванні тісто в закритому об'ємі виявляє властивості пружності за рахунок в основному газової фази та частково – пружного білкового скелета. Стисненню тіста в замкненому об'ємі присвячено багато праць, однак всі вони виконувалися на різних прикладах, за різними методами протягом останніх 45 років. Визначення впливу стискування тіста у процесі замішування на подальші технологічні процеси обґрунтовує інші методи дослідження його властивостей.

Процес тістоутворення відображає пластикатор, від положення його поверхні (зазору) залежить рециркуляція тіста і його механічна обробка. У наявних тістомісильних машинах процес пластифікації відбувається за рахунок збільшення частоти обертання робочого органу або тривалості даного процесу.

Під час пластифікації тісто зазнає дії стискувальних зусиль, що призводить до зменшення його об'єму всередині профільного каналу. Стискуваність дріжджового тіста Ігнатенко В.В. із співавторами [63] пояснює двома причинами: стискуваністю газових пухирців і деформацією структурної сітки тіста.

За умов пластифікації казати про зменшення відстаней між молекулами біополімерів у складі тіста недоцільно, оскільки для цього потрібен надто високий тиск. Тому вважаємо, що об'єм напівфабрикату зменшується тільки внаслідок стискування і подальшого розчинення у рідкій фазі тіста газових пухирців.

При пластифікації маса тіста багаторазово проходить через всі ділянки робочої камери, при цьому отримує деформації, які відповідають цим ділянкам. Зусилля на тісто характеризуються збільшенням тиску в напрямку обертання місильного барабана й асиметрією діючих сил, які визначають геометрію

робочого об'єму (рис. 4.1). Маса тіста при виході з дільниці пластифікації отримує деформацію розтягування одночасно з об'ємним зсувом. Найбільш суттєвою є складова тиску, що виникає внаслідок допускових напружень та зміни фізико-механічних властивостей тіста. З урахуванням конструктивних особливостей пластикатора і робочої камери, рівняння визначення тиску із математичної моделі процесу замішування (див. розділ 3 рівняння 3.11) має такий вигляд

$$P = \frac{2\mu}{R} \int \frac{\left(Q - \frac{\omega R h}{2}\right) d\varphi}{(R+h) \left[\ln\left(1 + \frac{h}{R}\right) - \frac{h}{2} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R+h}\right) \right]} + C_3$$

Нехай $P(\varphi = 0) = P_0$, тоді

$$P_0 = \frac{2\mu}{R} \int \Big|_{\varphi=0} + C_3 \Rightarrow C_3 = P_0 - \frac{2\mu}{R} \int \Big|_{\varphi=0}$$

$$P(\varphi) = P_0 - \frac{2\mu}{R} \int_0^\varphi \frac{\left(Q - \frac{\omega R h}{2}\right) d\varphi}{(R+h) \left[\ln\left(1 + \frac{h}{R}\right) - \frac{h}{2} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R+h}\right) \right]}$$

Введемо позначення

$$I_k(\varphi) = \int_0^\varphi \frac{h^k d\varphi}{(R+h) \left[\ln\left(1 + \frac{h}{R}\right) - \frac{h}{2} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R+h}\right) \right]} \quad k = 0,1$$

$$I_1(\varphi) = \int_0^\varphi \frac{h^1 d\varphi}{(R+h) \left[\ln\left(1 + \frac{h}{R}\right) - \frac{h}{2} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R+h}\right) \right]}$$

Тоді

$$P(\varphi) = P_0 + \frac{2\mu}{R} \left(Q I_0(\varphi) - \frac{\omega R}{2} I_1(\varphi) \right).$$

Вилучимо постійну змінну Q з умов, що розподіл тиску є періодичною функцією кута φ , тобто

$$P(\varphi + 2\pi) = P(\varphi).$$

У частковому випадку $\varphi(2\pi) = P(0) = P_0$.

Отже

$$P = P_0 + \frac{2\mu}{R} \left[QI_0(2\pi) - \frac{\omega R}{2} I_1(2\pi) \right]. \quad (4.24)$$

З рівняння бачимо, що величина розміщення маси тіста (кут поверхні пластикатора) значною мірою визначає величину тиску. З залежностей випливає, що стискування маса тіста відбувається при постійному тиску в межах 0.1 МПа. Дана величина коливається в малих значеннях. Для зазору $\delta = 20$ мм і при $Q = 0.01047$ м²/с є найбільші відхилення $2 \cdot 10^{-9}$ Па, а для $\delta = 30$ і при $Q = 0.01571$ м²/с мм – $1 \cdot 10^{-9}$ Па. За даною методикою можна визначати стискуваність тіста при пластифікації будь-яким місильним органом.

4.5.1. Вплив степені стискування тіста при замішуванні на його якість

Дослідження виконувалися з метою визначення оптимальних режимів приготування тіста і впливу його рециркуляції на якість тіста. Для визначення властивостей, тісто відбирали безпосередньо після пластикаційної поверхні (при середній і максимальній пластифікації) із відповідними зазорами. Вплив зазору між пластикаційною поверхнею і місильним барабаном на фізичні властивості клейковини наведено в таблиці 4.4.

Досліди виявили, що клейковина із проб тіста, взятих після пластикатора із різним зазором при однаковій рецептурі, відрізнялися за якістю. Найбільшу еластичність і розтяжність мала клейковина при пластифікації тіста з зазором $\delta = 30$ мм, а найменшу тривалість витікання із пластометра мало тісто, що замішане при $\delta = 20$ мм. Різниця якості клейковини, відмитої після пластифікації при $\delta = 25$ мм і $\delta = 30$ мм пояснюється якістю механічної обробки поверхнею

пластикатора. Ліпші якості має хліб із тіста при $\delta = 25$ мм та $\delta = 30$ мм, а також з іншими технологічними показниками (див. таблицю 4.4). Додаткова обробка тіста в пластикаторі з максимальною рециркуляцією шкідлива, оскільки якість тіста погіршується.

Таблиця 4.4

Фізичні властивості клейковини

Показники	Зазор між пластикаційною поверхнею і місильним барабаном при тривалості $\tau = 90$ сек		
	$\delta = 20$ мм	$\delta = 25$ мм	$\delta = 30$ мм
Розпливчастість кульки, мм	Кулька розпливалася повільно, клейковина зберігала свої властивості в часі		
Розтяжність, см	11	13	14
Еластичність по ПЕК-3а	56	65	66
Тривалість витікання із пластометра, сек	160	150	125

Наступні дослідження (таблиця 4.5) засвідчили, що на початкових стадіях дискретного процесу клейковина, відмита із замішаного тіста після вище згаданих зазорів, відрізнялася не значно. Це свідчить про те, що в процесі тістоутворення можна регулювати обробку тіста зміною рівня його стиснення в профільному каналі пластикатора. Необхідно відзначити ефективність замішування тіста при $\delta = 25$ мм і інтенсивність стиснення пластикатором.

Результати, отримані після серії дослідів (таблиця 4.5) при тривалості пластифікації тіста $\tau = 60$ сек показали, що тісто, замішане при $\delta = 25$ мм, має ліпші фізичні властивості, кулька із нього розпливається менше порівняно з тістом, замішаним при $\delta = 30$ мм. Хоча при $\delta = 20$ мм кульки розпливалися менше, це призводило до інших ускладнень роботи машини і якості тіста. При $\delta = 30$ мм відбувалася додаткова обробка тіста через частіше проходження

пластифікаційної поверхні. Тістова маса менше затримувалася у камері «інтенсивного» замішування і мала більшу лінійну швидкість обертання. Тут діяли явні сили адгезійної міцності, а тому ослабли фізичні властивості тіста. За розтяжністю, еластичністю і швидкістю витікання із пластометра, клейковина, відмита із тіста замішаного при $\delta = 25$ мм, була більш стійкою і мала відповідно ліпші якості, хоча за деякими показниками поступалася перед тістом, замішаним при $\delta = 30$ мм, що розглянемо далі.

Аналіз виконаних досліджень виявляє, що показники таблиць 4.4 і 4.5 дозволяють стверджувати про процес тістоутворення на різних величинах зазору між пластикаційною поверхнею і місильним барабаном. Цей процес триває як при $\tau = 90$ сек та $\tau = 60$ сек, але відрізняється якісними показниками тіста і технологічними операціями приготування хліба.

Одночасно відбувається додаткове навантаження на робочі органи машини: збільшується крутний момент; споживання електроенергії; тиск у тісті; тривалість замішування на 20 сек відбувається швидше, ніж при зазорі $\delta = 25$ мм і $\delta = 30$ мм. Величина $\tau_{\text{злм}}$ (тривалість замішування) є характеристикою досліджуваних динамічних залежностей, що впливають з фізичної суті процесу замішування і тісно пов'язаних з конструктивними особливостями машини. Вона також залежить від умов зміни вологості тіста. Звідси впливає, що механізм утворення клейковини в тісті, замішаному в безлопатевої дискретній машині, інший, ніж в інших машинах. Це можна пояснити тим, що на перших секундах замішування тіста набрякають білки і утворюється клейковина за рахунок дифузійних процесів (див. розділ 4).

Таблиця 4.5

Показники замішаного тіста на початкових стадіях процесу

Показники	Розміщення пластикаційної поверхні до місильного барабана при тривалості $\tau = 60$ сек		
	$\delta = 20$ мм	$\delta = 25$ мм	$\delta = 30$ мм
Розпливчастість кульки, мм через 0 хв	45	47	49
// - // 10 хв	46	50	52
// - // 20 хв	50	58	60
// - // 30 хв	58	62	68
Клейковина, розтяжність над лінійкою, см	14	17	16
Еластичність на приладі ПЕК-3а, одиниця приладу	57	64	66
Тривалість витікання із пластометра, сек	278	272	185

При зазорі $\delta = 30$ мм клейковина багатократно деформується і розтягується, що може розслабити її при більшій тривалості замішування. Кулька тіста, замішаного при $\delta = 30$ мм (1), виявила свої найліпші властивості - рис. 4.13а. Протягом трьох годин її поверхня розпливалася з меншою інтенсивністю, ніж кульки при $\delta = 20$ мм і $\delta = 25$ мм. Кулька замішаного тіста при $\delta = 20$ мм (3) виявила свої слабкі властивості на другій годині, тобто, коли почала розпливатися.

Отже, нелінійність параметрів тістомісильної машини виявляється у будь-яких режимах її роботи і є важливим аргументом, що переважно визначає динаміку процесу регулювання тістоутворення. Спрямованість на зміну динамічних параметрів машини при пластифікації дозволяє вибрати останні такими, щоб технологічна інтенсифікація процесу збігалася з поліпшенням динамічних характеристик пластифікатора, тобто $\delta = 25 - 30$ мм. Одночасно з

іншими параметрами трапляються непромиси тіста. Необхідно також оновити швидкість переміщення тіста в профільному каналі машини.

На фізичні властивості тіста й відмиту із нього клейковину впливає не тільки рівень механічної обробки при замішуванні, але й спосіб замішування в тонкому шарі. Тісто, замішане при однаковій вологості й зазорі $\delta = 20$ мм, $\delta = 25$ мм, $\delta = 30$ мм, має міцнішу консистенцію, ніж у машині з спіральним робочим органом (Діосна). Зменшення зазору між поверхнею пластифікатора і поверхнею місильного барабана до $\delta = 20$ мм ущільнює тісто, але подальше зменшення зазору призводить до ускладнення процесу замішування.

Незалежно від рівня обробки тіста при замішуванні тістомісильними машинами, воно розпливається, а при замішуванні в безлопатевої машині при $\delta = 20 - 25$ мм воно залишається міцнішим і ліпше зберігає формотримувальну властивість, як бачимо з рис. 4.13а, б.

Визначення кількості та якості клейковини, відмитої із тіста при різних умовах його приготування, виявило, що кількість сирої і сухої клейковини відразу після замішування, через годину – дві була практично однакою. При замішуванні тіста з зазором $\delta = 20 - 25$ мм сирої клейковини відмивалося на 2 – 2.5 % менше, ніж при замішуванні з $\delta = 30 - 35$ мм, а кількість сухої клейковини була однакою. Одночасно, за фізичними властивостями різниця була суттєвою. Як бачимо із рисунка 4.13, клейковина при $\delta = 20 - 25$ мм (1) та при $\delta = 25$ мм (2) сильніша і ліпше зберігає свої властивості, ніж клейковина з тіста, замішаного при $\delta = 30$ мм і більше. Це позитивний фактор при переробці борошна із слабкою клейковиною.

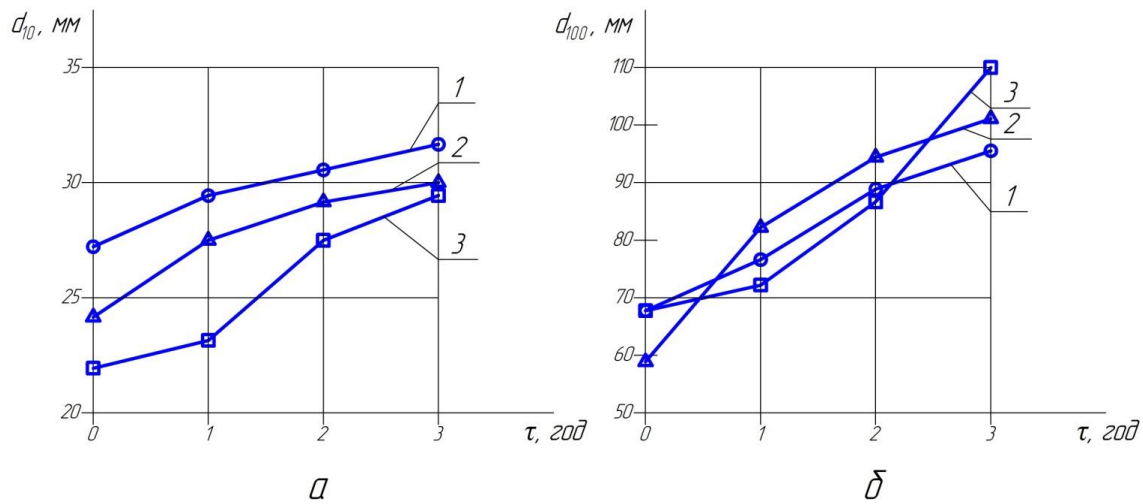


Рис. 4.13. Розпливчастість кульки: а – із 10 г клейковини (d_{10}); б – із 100 г тіста (d_{100}), при 1 – $\delta = 20$ мм; 2 – $\delta = 25$ мм; 3 – $\delta = 30$ мм

Виконані дослідження дозволили обґрунтувати факт позитивного впливу поверхні пластифікатора на укріплення структури тіста при раціональних значеннях зазору у робочій камері тістомісильної машини в межах $\delta = 25 - 30$ мм. Встановлено, що умови безлопатевого змішування підтвердили інтенсифікацію процесу, що лімітується текучістю тіста та не впливають на руйнування клейковини.

Розділ 5

Дослідження впливу конструктивних параметрів на тістоутворення

5.1. Дослідження руху частинки матеріалу в процесі замішування

Сучасні тенденції тістоприготування висувають вимоги у вирішенні значних наукових і науково-технічних проблем. Удосконалення технологічного процесу можливе тільки внаслідок оптимізації наукових досліджень з подальшим оперативним упровадженням їх результатів у промисловості. Використання моделювання при аналізі й перспективному прогнозуванні технологічних процесів переконливо підтверджує його переваги.

Більшість робіт, присвячених замішуванню, тільки описують відомі конструкції, основні вузли або конструктивні особливості машини й розглядають режими замішування конкретних рецептур. Конструювання машин і освоєння нових технологічних процесів відбувається переважно експериментальним шляхом.

Загальним недоліком подібних робіт є відсутність у них достатніх теоретичних уявлень і висновків, що забезпечують можливість обґрунтованого підходу до проектування тістомісильних машин з різними конструктивними і технологічними параметрами. Будь-яка теоретична обґрунтованість замішування для підтвердження своєї об'єктивності не може обійтися без практичної перевірки. Тому математична модель роботи тістомісильної машини заснована на приблизному розв'язку рівняння руху в'язкої рідини в камері машини. Це дозволяє обґрунтувати основні показники тістомісильної машини – продуктивність, потужність, конструктивні параметри робочої камери і робочих органів.

Проблема створення єдиного методологічного підходу до розроблення технології безлопатевого замішування тіста та апаратурної реалізації під час проектування, з використанням сучасних методів математичного моделювання є теоретичним та методологічним підґрунтям наукової концепції досліджень [146]. У розробленій дискретній безлопатевій тістомісильній машині робочий орган має просту геометрію, тому можливий аналітичний розрахунок, оскільки

відома гідродинаміка руху і термін перебування компонентів у перетинах багатогранної робочої камери [114,117,128].

На першому етапі у зоні релаксації відбувається взаємодія борошна з рідкими компонентами (водою, розведеними дріжджами, розчином солі згідно рецептурою), що супроводжується інтенсивним перемішуванням. Взаємодія відбувається в результаті взаємних контактних переміщень компонентів у ваговому режимі, як від дозаторів, так і просторово при обертовій дії місильного робочого органу, що своєю великою поверхнею створює додаткові умови. На другому етапі свіжоутворені грудочки компонентів активно продовжують контактувати із рідкою дозуючою складовою. Комплексна взаємна робота багатогранної робочої камери в зонах контакту суміші компонентів з робочим органом дозволяє створити всі умови для отримання однорідної суміші.

Для визначення основних параметрів нової конструкції безлопатевої машини та побудови математичної моделі розглядалася перша стадія як об'єм, у якому акумулюються рецептурні компоненти суміші для подальшого утворення тіста. Фізична сутність процесу вагового змішування полягає в тому, що при русі від дозаторів частки суміші, що безпосередньо стикаються між собою, зі стінками корпусу, отримують ударний імпульс і передають його віддаленішим шарам. Іншими словами, при коливаннях вібродозатора борошна по суміші проходять пружно-в'язкі хвилі. У результаті цього відбувається хаотичний рух часток суміші й своєрідне транспортування всього завантаження – циркуляція суміші в замкненому об'ємі багатогранної робочої камери.

При цьому слід зазначити, що прискорення руху у робочій камері з круговим обертанням робочого органу настільки великі, що завантажені компоненти то відриваються від його поверхні і стінок робочої камери, то контактують з ними. Тому циркуляція суміші складається з польотів і ковзань її щодо поверхонь.

Вивчення закономірностей руху завантаження у безлопатевої дискретній тістомісильній машині є першим завданням теорії процесу замішування. Другим завданням є дослідження закономірностей замішування (гомогенізації) часток суміші, що настає внаслідок взаємодії у ваговому стані, так і при циркуляції її часток.

Компоненти, що підлягають змішуванню, надходять від дозуючої техніки на дільницю релаксації і спрямовуються на поверхню місильного барабана і робочої камери. Внаслідок цього дрібні частинки борошна і рідких компонентів взаємодіють у зваженому стані і падають на поверхню барабана, а якась частина рухається по внутрішній поверхні робочої камери.

Дослідимо процес переміщення частинки матеріалу (матеріальної точки) на поверхні обертаючого місильного барабана (рис. 5.1). Місильний барабан здійснює обертальний рух навколо горизонтальної осі з кутовою швидкістю ω , що проходить через центр барабана.

Розташуємо початок нерухомої системи координат в центрі осі, спрямувавши вісь X уздовж горизонтальної осі робочої камери в напрямку переміщення компонентів всередину барабана. Початок рухомої координати осі Y розташуємо у центрі частинки компонентів, що відповідає розміщенню її на поверхні місильного барабана з його відносним рухом обертання, як показано на рисунку 5.1.

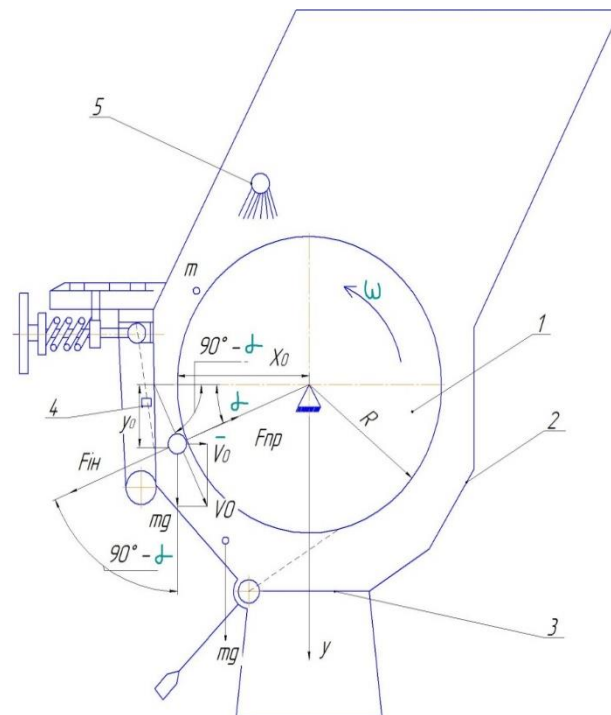


Рис.5.1. Рух частинки компонентів по поверхні місильного барабана: 1 – рифлений місильний барабан; 2 – багатогранна робоча камера; 3 – шибєр для вивантаження тіста; 4 – патрубок для вивантаження; 5 – пасивний вібраційний пристрій; 6 – нагнітальний пристрій

Утворена частинка матеріалу m на перших порах прилипає до поверхні барабана й обертається разом із місильним барабаном та рухається по ньому. Під час рівномірного обертання барабана на частинку будуть діяти: сила інерції F_{in} , сила прилипання $F_{пр}$, сила ваги mg , відносна швидкість частинки v_0 . Сила інерції залежить від частоти обертання місильного барабана, маси і радіуса, тобто $F_{in} = m\omega^2 R$.

Під дією ваги частинки mg (m - маса частинки компонентів, кг; g – прискорення вільного падіння, м/с²) та змінного коефіцієнта переносного руху частинки β виникає сила прилипання. Коефіцієнт переносного руху частинки повинен бути $\beta > 1$. Його значення встановлено дослідним шляхом, що має свої значення 1.5...2,3. Сила прилипання становить $F_{пр}^{max} = mg\beta$.

Даний коефіцієнт переносного руху частинки встановлює взаємодію частинки компонентів із поверхнею місильного барабана. Він впливає тільки на першій стадії замішування і визначає рух частинки.

Таким чином, рух частинки компонентів, що показано на рисунку, буде описуватися рівнянням

$$\begin{aligned} F_n^{in} + mg \sin \alpha &= mg\beta \\ m\omega^2 R + mg \sin \alpha - mg\beta &= 0 \\ mg \left[\frac{\omega^2 R}{g} + \sin \alpha - \beta \right]^2 &= 0. \end{aligned}$$

Отже, умова відриву частинки від барабана, буде $\sin \alpha = \beta - \frac{\omega^2 R}{g}$.

При цьому $\alpha = \arcsin \left(\beta - \frac{\omega^2 R}{g} \right)$.

Визначимо умови рівноваги частинки за якої вона залишатиметься у стані відносного спокою на поверхні й буде рухатися вниз під дією сили ваги. Це можливо за умови, що усі сили, які діють під час обертання барабана, будуть взаємно врівноважені. Відповідно умова відриву буде

$$x_0 = -R \cos \alpha, y_0 = -R \sin \alpha$$

Швидкість частинки $v_0 = \omega R$ і відповідно відносна швидкість вздовж руху по

осях поверхні барабана і робочої камери
$$\begin{cases} \dot{x}_0 = \omega R \sin \alpha \\ \dot{y}_0 = \omega R \cos \alpha \end{cases}.$$

З цього моменту часу, який приймаємо $t=0$, частинка рухається тільки під дією сили ваги (опором повітря нехтуємо).

Отже, $m \ddot{x} = 0$, $m \ddot{y} = mg$. Відповідно $\ddot{x} = 0$, $\ddot{y} = g$.

Після інтегрування рівняння $\dot{x}_0 = \omega R \sin \alpha$, розв'язок його буде описуватися рівнянням $x = \omega R t \sin \alpha - R \cos \alpha$.

Розв'язок другого рівняння описується $\ddot{y} = g$ та $\dot{y}_0 = \omega R \cos \alpha$,

$$y = \frac{gt^2}{2} + \omega R t \cos \alpha + R \sin \alpha.$$

Враховуючи всі приведені розрахунки, знайдемо рівняння траєкторії частинки матеріалу в робочій камері машини.

$$\frac{x + R \cos \alpha}{\omega R \sin \alpha} = t;$$

$$y = \frac{g}{2} \left(\frac{x + R \cos \alpha}{\omega R \sin \alpha} \right)^2 + \omega R \cos \alpha \cdot \frac{x + R \cos \alpha}{\omega R \sin \alpha} + R \sin \alpha = \frac{g}{2\omega^2 R^2 \sin^2 \alpha} (x^2 + 2xR \cos \alpha + R^2 \cos^2 \alpha)$$

$$+ ctg \alpha (x + R \cos \alpha) + R \sin \alpha = \frac{gx^2}{2\omega^2 R^2 \sin^2 \alpha} +$$

$$\frac{g2R \cos \alpha}{2\omega^2 R^2 \sin \alpha} x + x ctg \alpha + \frac{gR^2 \cos \alpha}{2\omega^2 R^2 \sin^2 \alpha} +$$

$$R \cos \alpha ctg \alpha + R \sin \alpha = \frac{gx^2}{2(\omega R \sin \alpha)^2} + \frac{gctg \alpha}{\omega^2 R \sin \alpha} x +$$

$$x ctg \alpha + \frac{g \cos^2 \alpha + R \cos \alpha ctg \alpha \cdot 2\omega^2 \sin^2 \alpha + 2\omega^2 R \sin^3 \alpha}{2(\omega \sin \alpha)^2} =$$

$$\frac{gx^2}{2(\omega R \sin \alpha)^2} + x ctg \alpha \left(1 + \frac{g}{\omega^2 R \sin \alpha} \right) + \frac{g \cos^2 \alpha + 2\omega^2 R \sin^2 \alpha \left(\sin \alpha + \frac{\cos^2 \alpha}{\sin \alpha} \right)}{2\omega^2 \sin^2 \alpha} =$$

$$= \frac{gx^2}{2\omega^2 R^2 \sin^2 \alpha} + x ctg \alpha \frac{g + \omega^2 R \sin \alpha}{\omega^2 R \sin \alpha} + \frac{g \cos \alpha + 2\omega^2 R \sin^2 \alpha}{2\omega^2 \sin^3 \alpha}.$$

$$y = \frac{1}{2\omega^2 \sin \alpha} \left[\frac{gx^2}{R^2 \sin \alpha} + 2xctg\alpha \cdot \frac{g + \omega^2 R \sin \alpha}{R} + gctg^2\alpha + 2\omega^2 R \right]$$

Аналітичний розв'язок рівняння дозволяє встановити переміщення частинки в робочій камері машини під дією її масових сил. Реалізація даної методики у системі комп'ютерної математики MathCAD дозволяє побудувати графік траєкторії частинки, що наведена на рис.5.2.

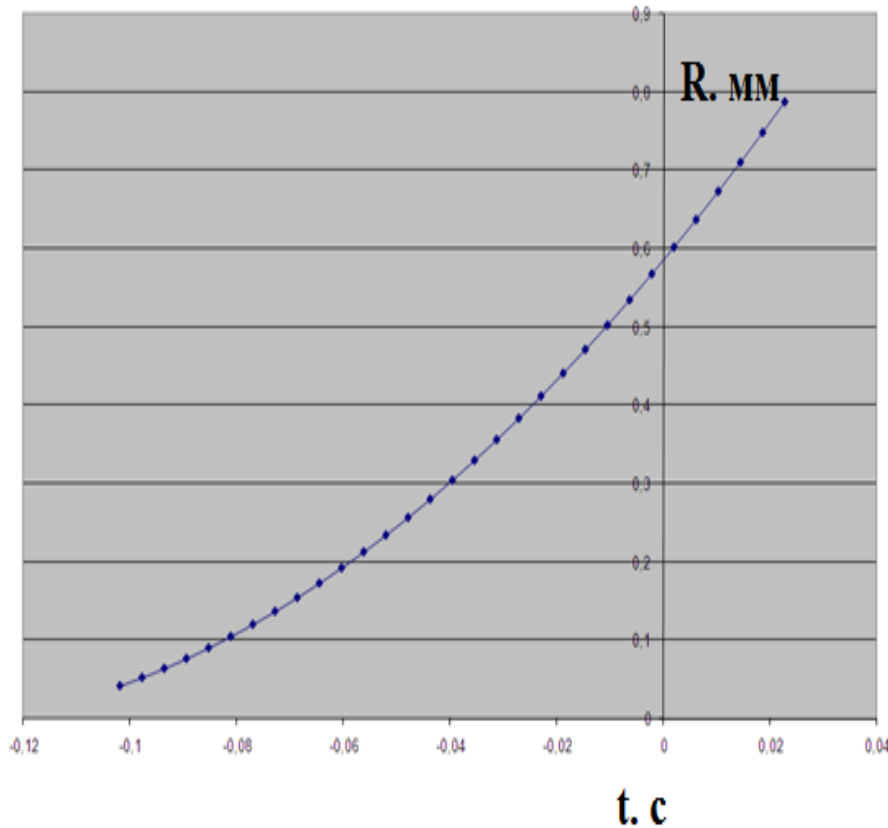


Рис. 5.2. Траєкторія руху частинки в робочій камері машини

В основі організації процесу дозування компонентів дискретно-імпульсним методом встановлюється механізм взаємодії безлопатевого робочого органу з сумішшю компонентів. Побудована адекватна математична модель руху матеріальної частинки визначає характер процесу приготування тіста залежно від технологічних особливостей і конструктивних параметрів. Це підтверджує позитивне вирішення використання гравітаційного перемішування на першій стадії та подальше замішування компонентів примусовою дією горизонтального безлопатевого робочого органу.

5.2. Дослідження ефективної площі поверхні зерен крохмалю з використанням наближених числових методів

Борошно хлібних злаків, що складається переважно із гідрофільних полімерів, при взаємодії з рідкими компонентами (водою) утворює структуру тіста коагуляційного типу. Подібні структури (по П.А. Ребіндеру) утворюються за рахунок слабких міжмолекулярних зв'язків груп молекул. Вплив рідких компонентів на полімери є досить багатостороннім і складним. Зокрема, такий вплив можна охарактеризувати зміною фізичних, механічних, структурних, кінетичних, хімічних і термодинамічних властивостей полімерів. Тому при гідратації борошна в процесі приготування тіста є конкурентна боротьба окремих з'єднань за розчинник – воду, в якій найбільш активні водорозчинні з'єднання. Основні процеси взаємодії полімерів з водою – розчин і їх набрякання.

У роботах [77,82], детально розвинено уявлення про структурну, кінетичну і термодинамічну активність води та вплив цих факторів на утворення тіста. Зазначимо, що якісна взаємодія поверхні рідких компонентів з твердими частинками борошна має важливе технологічне значення, а, відповідно, вносить значний вклад у перебіг фізичних, хімічних процесів на межі поділу фаз. Так як компоненти є структурно активними, це у свою чергу визначає характеристики стадійності процесу в робочій камері машини. Під структурною активністю розуміється можливість компонентів змінювати конформаційний набір молекулярних утворень у полімері при його взаємодії. Крім того, структурна активність компонентів залежить від рецептури, механічної взаємодії, форми дозування й кількості дисперсних частинок.

Кінетичну активність суміші компонентів пов'язують з їх здатністю впливати на рухливість кінетичних одиниць молекул (груп, сегментів, ланцюгів), а також на час релаксації тіста. При цьому рідкі компоненти можуть бути активними відносно всього дозуючого борошна. Змішування дисперсних частинок на першій стадії процесу супроводжується змінами термодинамічних характеристик системи (густини, ізотермії, ентальпії, питомої роботи). Отже,

термодинамічна активність рідких компонентів полягає у здатності впливати на стан термодинамічної рівноваги і на значення термодинамічних характеристик полімера.

Під хімічною активністю компонентів розуміється здатність поверхні дисперсних частинок вступати у хімічну взаємодію при механічній дії на них. Хімічна активність, у свою чергу, залежить від кількості активних зон на поверхні розподілу фаз, механічної обробки. У працях авторів показано [82,85], що в процесі механічної обробки гелі та розчини полімерів мають властивість орієнтації в площині дії зовнішніх зусиль. Це сприяє збільшенню числа поперечних міжмолекулярних зв'язків і якісному утворенню тіста. Зауважимо [82,102], що хімічна активність рідких компонентів суттєво впливає на умови стадійності. Вона залежить від температурно – часових режимів, конструктивних факторів та дозування компонентів.

Дослідження і контроль структурно – механічних властивостей тістоутворення дозволяє встановити взаємозв'язок кількісних та якісних характеристик продукції, яка виробляється. До основних кількісних показників, що безпосередньо впливають на вихід продукції відноситься вологість тіста, тобто активність взаємодії структурного складу борошна з рідкими компонентами. Визначення і керування структурно-механічними властивостями тіста дозволяє одночасно змінити перераховані основні кількісні показники і якісні характеристики виробів у параметрах встановлених оптимальних норм.

Усі перераховані показники вказують, що фізико-хімічні властивості борошна (особливо крохмалю) повинні впливати на структуру й механічні показники тіста. Відомо [82,85], що крохмаль $(C_6H_{10}O_5)_n$ за складом займає перше місце (60...65%). Це природне полімерне з'єднання складається із залишків цукру альфа глюкози. Молекули крохмалю є досить лабільними і реакційно спроможними з'єднаннями. Тому гідрофільні властивості крохмала – набухання і розчинення у воді. Ці властивості залежать від швидкості процесу їх взаємодії з водою, що визначається густиною молекул в одиниці об'єму.

Всі перераховані показники вказують, що фізико-хімічні властивості крохмалю повинні сприяти та вказувати на суттєвий вплив при тісто утворенні. Характеристики стадійності утворення тіста (зміна взаємодії крохмалю з водою) в робочій камері машини також визначають його механічні властивості. Ці властивості можна змінювати в цілях більш правильного використання крохмалю і тих продуктів, до складу яких він входить.

Відомо, що для визначення топології поверхні й полідисперсності часток тіста використовують мікроскопію, ситовий аналіз і седиментаційні методи. Однак відомі методи не є досить точними і достатньо трудомісними. Ми пропонуємо нову методику проводити аналіз поверхонь дисперсних часток методом електронної мікроскопії з обробкою зображень за допомогою математичного апарату, реалізованого з використанням програмного забезпечення у системі MathCad. Такий підхід допоміг отримати точнішу інформацію про досліджуванитй об'єкт, що дозволяє в подальшому прогнозувати його поведінку при створенні гетерогенних систем.

З метою порівняльного аналізу ефективності впливу компонентів на процеси структуроутворення у матриці при проведенні цілого ряду досліджень, вибрано крохмаль. Поетапно досліджували взаємодію крохмалю з водою на кожному етапі замішування (при дотриманні стадійності на безлопатевій тістомісильній машині). Перший етап полягав у фотографуванні взятих зразків за допомогою мікроскопа і фотоапарата марки OLYMPUS C-8080. Витримка при фотографуванні була $2 \pm 0,1$ с, що дозволило отримувати фотографії у форматі JPEG при збільшенні у 10^4 разів (рис.5.3).

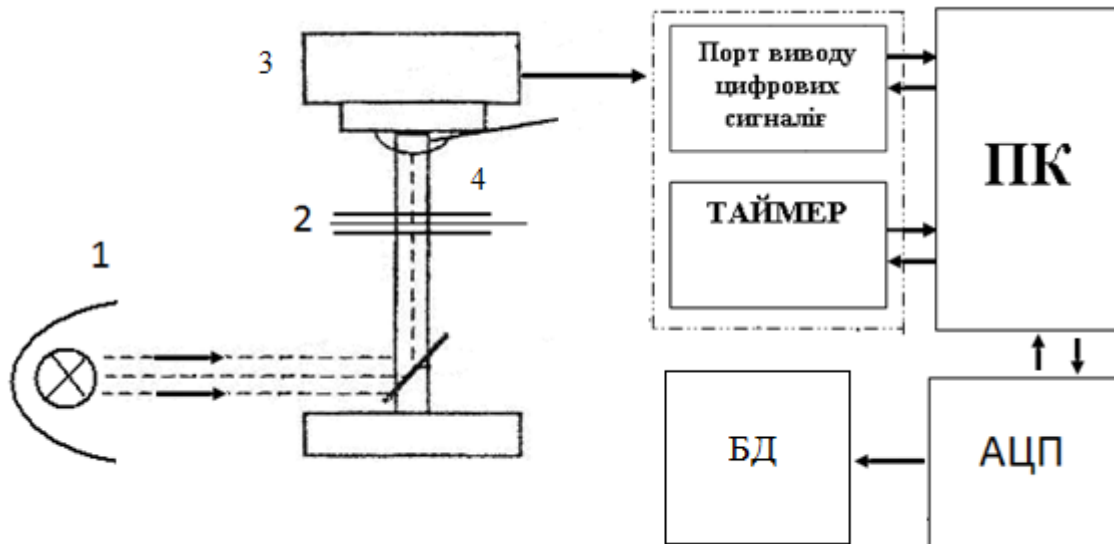


Рис. 5.3. Технологічна схема визначення оцінок геометричних характеристик зерен крохмалю: 1 – джерело світла; 2 – досліджуваний зразок; 3 – мікроскоп; 4 – цифровий фотоапарат

На другому етапі обробляли фотографії в інтерактивному режимі й обчислювали ефективний периметр та ефективну площу поверхні дисперсних часток. Визначення характеристик розподілу крохмалю в матриці пов'язано з оцінюванням периметра проекцій часток, як елементів дискретної множини (рис.5.4). Лінійні розміри мікрооб'єктів оцінювали за допомогою введення метрики, запропонованої Ріманом для поверхонь нульової кривини [10,11].

При аналізі проекції зразків метрика має вигляд

$$dS = \sqrt{\sum_i dx_i^2} \pm l_0 \quad (5.1)$$

Точність вимірювань l_0 визначається “пробним тілом” досліджуваної області, яким є піксель цифрового зображення, оскільки меншого елемента для кожного окремого експерименту не існує. Вимірювання, що проводили з допомогою встановленого масштабу, мали високу точність і метрика (5.1) була статистичною.

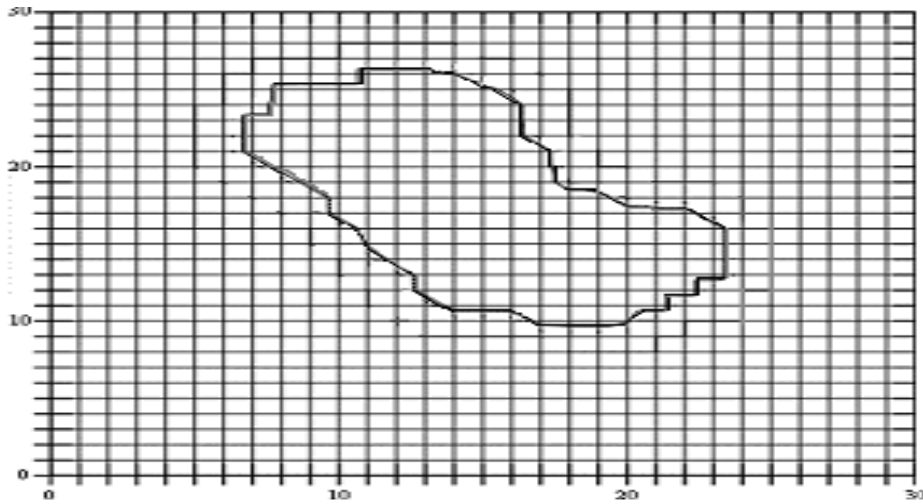


Рис.5.4. Загальний вигляд зображень дисперсних часток крохмалю, що підлягав комп'ютерному аналізу (масштаб $10^4:2$)

Для k -тої елементарної ділянки Δl_k визначали елемент довжини ΔS_k у межах проекції об'єкта через горизонтальні Δx_k та вертикальні Δy_k прирости координат руху пробної точки по довж дуги периметру

$$\Delta S_k = \sqrt{\Delta x_k^2 + \Delta y_k^2} \pm l_k, \quad (5.2)$$

де величина похибки l_k є рівномірно розподіленою випадковою величиною

$$-l_0 < l_k < l_0. \quad (5.3)$$

В областях, ефективні радіуси яких менші за l_0 , точки досліджуваних об'єктів програмою не розрізняються, а тому не можуть вважатись окремими. Простір вимірювань має зернисту структуру, кожна окрема точка якого оточена сферою з радіусом l_0 .

Отже, елемент довжини об'єкта визначали за формулою

$$\Delta x_k = \Delta x = 2l_0.$$

Тоді

$$\Delta S_k = l_0 \left(2 \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta y_k}{2l_0} \right)^2} \pm 1 \right). \quad (5.4)$$

Для визначення довжини L периметра, об'єкт розбивали на дуги L_m так, щоб кількість спільних точок з довільною прямою, паралельною хоча б до однієї з осей вибраної системи координат, була б не більше однієї.

Тоді, якщо

$$L_m = \sum_k \Delta S_k, \quad (5.5)$$

і враховуючи (5.4), а також зауваження про рівномірний розподіл похибки вимірювання (5.3), отримали

$$L_m = 2l_0 \left(\sum_k \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta y_k}{2l_0} \right)^2} \pm \theta_k \right), \quad (5.6)$$

де $0 \leq \theta_k < 0,5 \cdot 10^{-M}$, M – невід'ємне ціле число.

Периметр P обчислювали за формулою

$$P = \sum_{m=1}^n L_m.$$

Враховуючи кількість дуг L_m розбиття (5.6), периметр обчислювали за формулою

$$P = 2l_0 \left(\sum_{m=1}^n \sum_k \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta y_{k,m}}{2l_0} \right)^2} \pm \Delta \right), \quad (5.7)$$

де $\Delta = nl_0$ – межова похибка.

Оцінювання граничної похибки здійснювали для надійності $\gamma = 0,99$ і N – верхньої межі числа пікселів, по яких проходить ефективна межа. Це не враховує

кратність проходу реальної межі по кожному пікселю. Зокрема для $M = 0$ і $N \approx 100$ маємо $\Delta \leq 7,5$ (пікселів).

За розробленою методикою після оцінювання величини l_0 у пікселях (1 піксель становить $10583 \cdot 10^{-6}$ мм), слід обчислити периметри проекцій часток крохмалю з точністю до 10^{-6} мм, що на кілька порядків перевищує шорсткість поверхні частки, яка оцінюється в межах $R_a = 0,02$. Зауважимо, що в дослідженнях обчислювали ефективний периметр часток, який не враховує параметрів довжини, дрібніших від межевої величини l_0 .

Крім того, ефективний агрегований діаметр дисперсних часток обчислювали за формулою

$$d^a = \sqrt{d_{\min} d_{\max}},$$

а міру округлості зразків обчислювали за формулою

$$C = \frac{\pi \cdot d^a}{P}.$$

Міра круглості характеризує близькість форми проекції часток до кругової форми і змінюється в межах від нуля до одиниці.

Площу поверхні дисперсних часток оцінювали при враховуванні ефективного агрегованого діаметра

$$S^a = \pi (d^a)^2. \quad (5.8)$$

Відомо, що однією з найважливіших технологічних властивостей компонентів є їх седиментаційна стійкість до взаємодії. Ми запропонували методику визначення коефіцієнта седиментації дисперсних часток ν , який враховує структурні характеристики крохмалю, зокрема

$$\nu = \nu \frac{S^a}{V^a} = \frac{6\nu}{d^a},$$

де ν – коефіцієнт взаємодії полімера з водою, що розраховується на одиницю площі поверхні частки.

У дослідженнях використано одну полімерну матрицю, отже коефіцієнт ν можна вважати сталим. Тоді умовний коефіцієнт седиментації часток розраховували за формулою

$$\nu_y = \frac{6}{d^a}.$$

Зазначимо, що коефіцієнт седиментації не враховує в'язкості рідких компонентів, хімічної активності й магнітних властивостей.

Розроблена методика дає можливість виразити дисперсність компонентів на даному етапі досліджень. Можна охарактеризувати особливості впливу компонентів на їх властивості, що дозволяє прогнозувати і регулювати перебіг міжфазних процесів при формуванні тіста у виробництві. При оцінюванні фізичних характеристик дисперсних наповнювачів важливо враховувати такі параметри дисперсних компонентів, як форма, зернистість, розподіл часток за розмірами, їхню хімічну (структурну, кінетичну, термодинамічну) активність і магнітну природу.

На основі проведених досліджень стадійності замішування тіста при використанні розробленої методики розраховано периметр, площу поверхні, відхилення від круглості та коефіцієнт седиментації часток. Отримані результати можуть бути використані для регулювання фізико-хімічних процесів на межі поділу фаз. Це дозволяє отримання тіста з високими технологічними характеристиками.

5.3. Використання спектрального аналізу ділянок полімерного борошна при дослідженні параметрів поверхневих шарів тіста

Відомо [105,112], що введення компонентів в робочу камеру тістомісильної машини дискретно-імпульсним методом призводить до їх

змішування й утворення гетерогенної ізотропної структури тіста. При цьому значний вплив на механічні властивості тіста мають сорбційні процеси, що проходять на межі поділу фаз “борошно – вода” та визначають взаємодію між макромолекулами. Зауважимо, що в результаті адсорбції на поверхню адсорбента переходять не тільки макромолекули, але й агрегати макромолекул. Це зумовлює зміну густини однорідності структури тіста, у першу чергу, навколо часток борошна.

Активна взаємодія компонентів (гідротаційні процеси) призводить до утворення зовнішніх поверхневих шарів (ЗПШ) з властивостями, які при проходженні процесу замішування постійно відрізняються від своїх попередніх властивостей. Зміна структурних характеристик тіста навколо дисперсних часток, у свою чергу, змінює їх властивості в цілому. Отже, науково обґрунтоване введення компонентів у робочу камеру машини при оптимальному вмісті активного дисперсного борошна забезпечує прогнозоване регулювання властивостей тіста.

Залежно від фізичної природи борошна на межі поділу фаз “полімер – вода” можуть формуватися поверхневі шари різної густини, протяжності і ступеня зшивання [2,4]. На даному етапі досліджень характеристики таких шарів вивчено ще недостатньо, оскільки відсутня єдина наукова методика для їх дослідження. Тому актуальним на сьогодні є дослідження характеристик ЗПШ полімерного борошна навколо води на основі нових методологічних підходів.

Значення середніх розмірів часток, які розраховують при стандартних методиках досліджень, не забезпечують точності при оцінюванні площі поверхні крохмалю або інших полімерів. Можливі значні відхилення від їхнього середнього розміру. Оскільки відмінність у характері розподілу гідротаційних часткових зв'язків протягом стадійності процесу замішування суттєво впливає на реологічні та фізико-механічні властивості тіста, то на початкових етапах необхідно досліджувати площу поверхні взаємодії часток, їх поведінку при різних механічних впливах та їх ступені впливу. Переважно для оцінювання полідисперсності й топології геометричної поверхні борошна використовують

напівлогарифмічні логарифмічні криві середньочислового або середньомасового розподілу за розмірами. Розподіл часток за розмірами у логарифмічних координатах будують у вигляді прямої лінії, де відхилення від неї характеризує передісторію і характеристики дисперсного середовища.

При дослідженні геометричних характеристик ЗПШ в утворюючому тісті використано рецептуру для хліба пшеничного першого сорту. Рецептурний склад тіста для експериментальних досліджень розроблено згідно з технологічною інструкцією Т18 Укр 52-96, за ГОСТ 28207-90, РЦ Укр 52-96. Склад і режими приготування тіста наведено у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

Склад і режими приготування тіста пшеничного 1 сорту

Компоненти	Рідка фаза	Тверда фаза
Борошно, кг	—	100
Вода, кг	60	—
Дріжджі, кг	2	—
Сіль, кг	1.5	—
Маргарин, кг	—	—
Режими приготування		
Тривалість замішування, хв	рідкої фази 3-5	дискретне
Температура, °С	27 – 29	замішування
Кінцева кислотність після замішування, °Н		тіста 3,5–4
		29–30
		2.8–3

Методика дослідження параметрів поверхневих шарів у тістоутворенні полягає у тому, що проби компонентів відбирали через кожних 20с із робочої камери тістомісильної машини. Проби формували товщиною $h = 0,4 \pm 0,01$ мм на

скляних підставках. Це дозволило спостерігати за допомогою мікроскопа проходження фізико-хімічних процесів і формування поверхневих шарів при змішуванні компонентів.

У зразках проб, взятих на різних етапах взаємодії, ми проводили фотографування зразків крохмалю. Відповідно обробляли фотографії у інтерактивному режимі з використанням програмного забезпечення у системі MathCad. При обчисленні площі січення поверхневих шарів з кожної фотографії було вибірково вибрано фрагменти із поверхневими шарами.

Зазначимо, що такі шари складаються безпосередньо з граничних (адсорбційних) поверхневих шарів, що входять до структури зовнішніх поверхневих шарів (ЗПШ), які формуються при структуроутворенні тіста та є результатом розподілу води навколо дисперсних часток (крохмалю). Тобто, за розподілом об'єму ЗПШ чи поверхневих шарів у цілому можна стверджувати про вплив процесу на формування тіста зі зміненими властивостями.

Отже, об'єм ЗПШ характеризує взаємодію компонентів при утворенні тіста та визначає вплив фізичної природи дисперсного борошна навколо його дисперсних часток (крохмалю), що характеризують ступінь змішування, а отже, й фізико-механічні властивості.

Згідно з розробленою методикою, аналізували оптичні зображення тонких зразків змішаних компонентів і обчислювали кількість точок біло-сіро-чорної градації навколо часток крохмалю на фотозображенні. Фрагменти фотографій були представлені у вигляді функції (рис. 5.5)

$$F = f(x, y, z),$$

де x, y – поточні значення координати точки фрагмента за осями; z – значення кольору поточної точки.

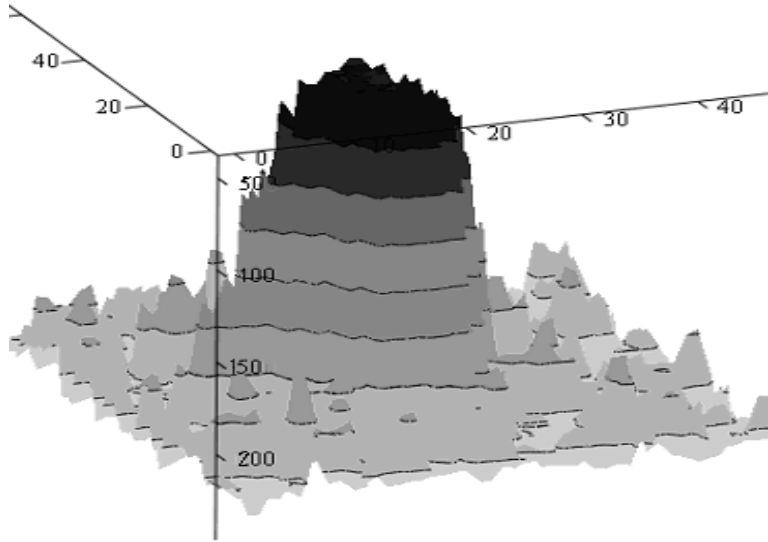


Рис.5. 5. Гістограма розподілу кольорів фрагмента фотографії

На наступному етапі функцію було переведено у матрицю a (рис. 5.6), у результаті чого отримали можливість підрахувати кількість точок кожного кольору на фрагменті. Для групування точок застосовували створену програму з використанням вбудованої мови програмування у системі MathCad, у якій значення 255 відповідає білому кольору, а 0 – чорному [9]. Таким чином рахували кількість точок для всього спектра кольорів від білого до чорного.

На основі вибраного фрагмента було створено матрицю, кожен елемент якої $f[i, j]$ містив числове значення кольору точки з відомими координатами. Межі зміни параметрів i, j залежали від величини виділеного фрагмента.

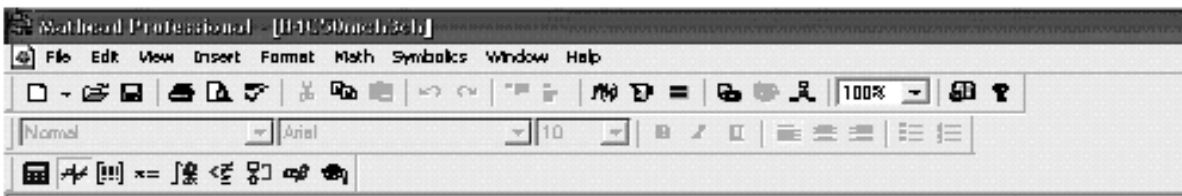
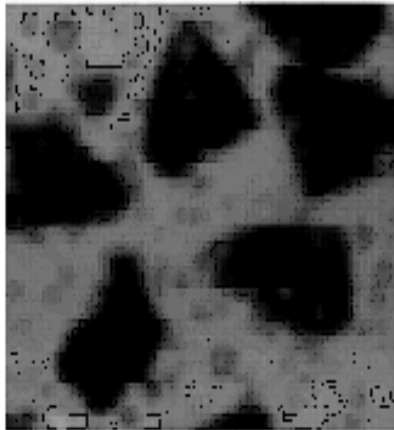
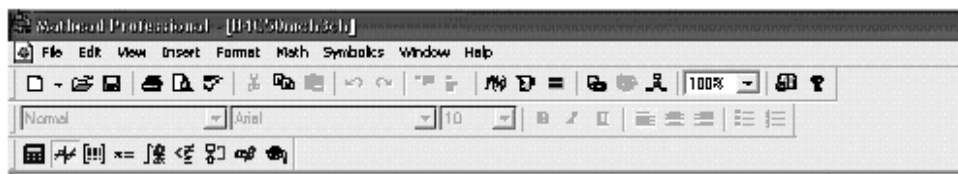


Рис. 5.6. Фрагмент матриці кольорів вихідного зображення



	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	255	65	65	65	69	69	69	69	69	69
1	255	65	65	65	69	69	69	69	69	69
2	255	65	65	65	69	69	69	69	69	69
3	255	62	65	65	69	69	69	69	69	69
4	255	62	65	65	69	69	69	69	69	69
5	255	62	62	65	69	69	69	69	69	69
6	255	58	62	65	69	69	69	69	69	73
7	255	58	62	65	69	69	69	69	69	73
8	255	58	62	65	69	69	69	69	73	73
9	255	57	62	65	69	69	73	73	73	73
10	255	57	62	65	69	69	73	73	73	73
11	255	57	62	65	69	73	73	73	73	77
12	255	57	62	65	69	73	73	73	77	77
13	255	57	62	65	73	73	73	73	77	77
14	255	57	61	65	73	73	73	77	77	77
15	255	57	61	65	73	73	73	77	77	77

Для кожного значення $i \in 0..H$ (H – довжина фрагмента у пікселях) та $j \in 0..V$ (V – ширина фрагмента, у пікселях) вибирали значення z в матриці $color[z]$, до відповідного елементу додавали одиниці ($z \in 0..255$). У результаті цього було сформовано матрицю з кількістю точок кожного відтінку (рис. 5.7).



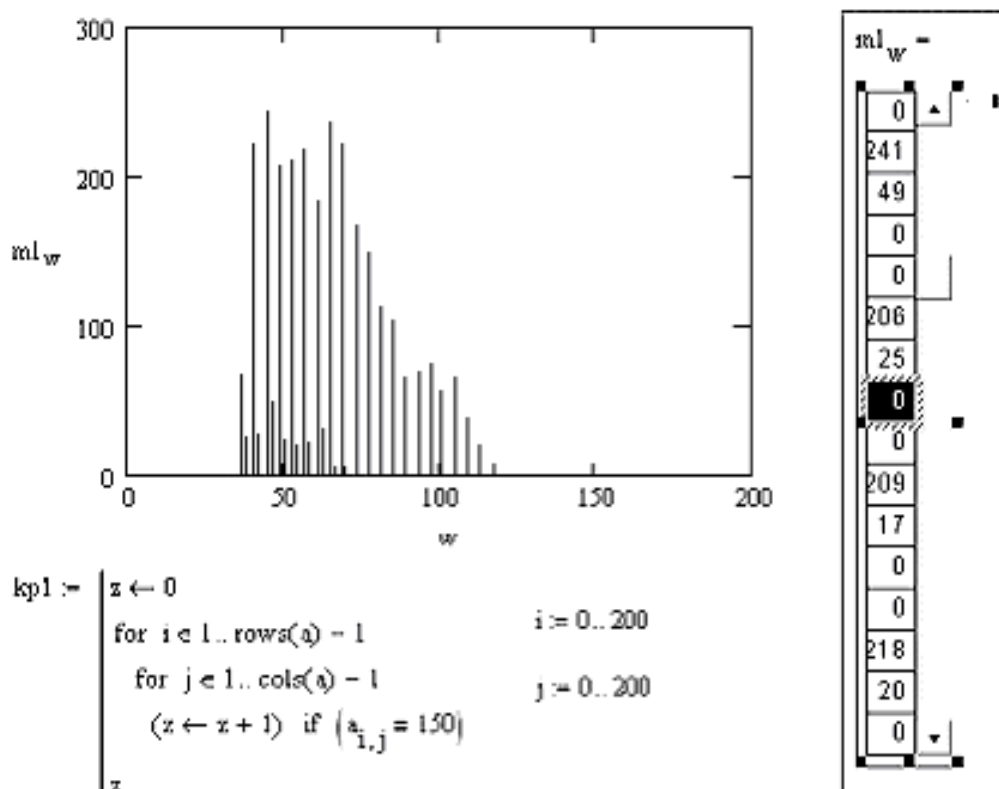


Рис. 5.7. Гістограма та сформована матриця кількості кольорів

Для визначення площі необхідного об'єкта було створено однорідне заповнення контурів крохмалю, ЗПШ і полімерної матриці з використанням ліній рівня та оброблено усі значення $f[i, j]$ (рис. 5.8). При підрахунку кількості точок z кольорів, що більші від n (n – граничне значення кольору крохмалю, яке вибирали візуально), замінювали величинами $n_{сер}$ (середній колір крохмалю, який становить $n_{сер} = \frac{n + 255}{2}$). Усі значення z , які менші від m (m – граничне значення кольору полімерної матриці), замінювали величинами $m_{сер}$ (середній колір матриці, який становить $m_{сер} = \frac{m}{2}$). Значення z у межах $p1 > z > m$ замінювали величинами $p_{сер1}$ (середній колір першого ЗПШ). Значення z у межах $p2 > z > p1$ замінювали величинами $p_{сер2}$ (середній колір другого ЗПШ). Значення z у межах $p3 > z > p2$ замінювали величинами $p_{сер3}$ (середній колір третього ЗПШ). Значення z у межах $p_i > z > p_{i-1}$ замінювали величинами $p_{сер i}$ (середній колір i -того ЗПШ).

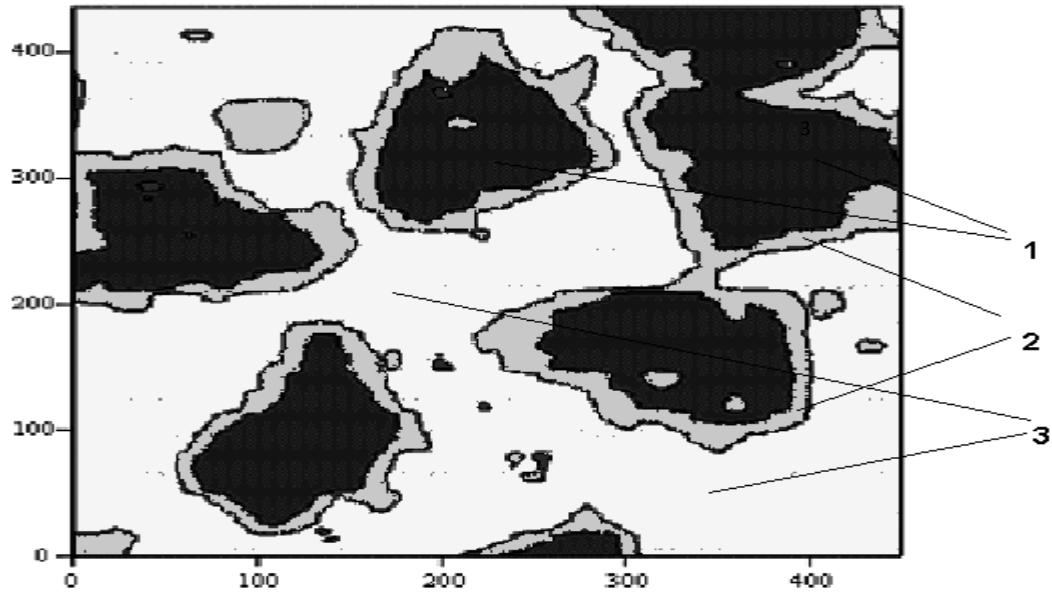


Рис.5. 8. Поверхні рівня при обробці вихідного фрагмента: 1 – частка крохмалю; 2 – ЗПШ; 3 – полімерна матриця

Надалі рахували кількість точок у матриці зі значеннями $n_{сер}$, $m_{сер}$, $p_{сер}$, що дозволило обчислити площу січення ЗПШ навколо крохмалю різної фізичної природи і дисперсності (рис. 5.9).

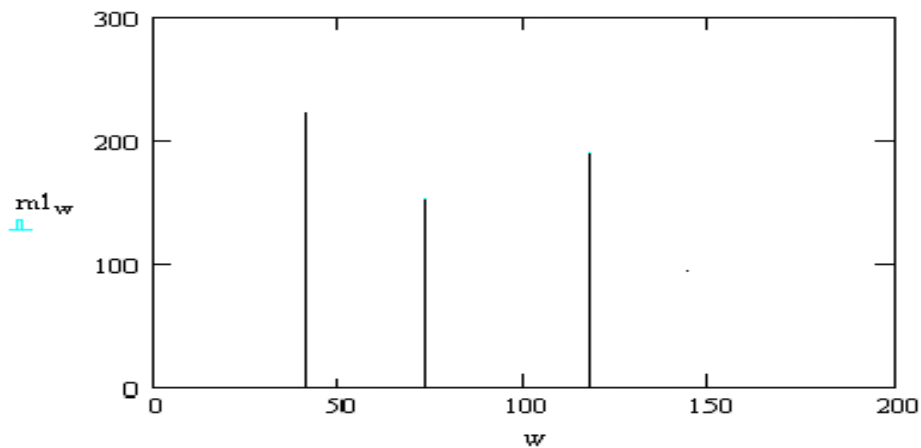


Рис. 5.9. Гістограма кількості точок

Площу січення поверхневих шарів обчислювали, виходячи з роздільної здатності фрагмента R dp_j (кількість точок на квадратний дюйм), де площу однієї точки знаходили за формулою

$$S_T = \frac{R^2}{S_1},$$

де R – роздільна здатність фрагмента ($R = 4800$ пікселів); S_1 – коефіцієнт приведення площі.

Коефіцієнт приведення площі знаходили за формулою

$$S_1 = \frac{K^2}{M^2},$$

де: M – коефіцієнт збільшення при фотографуванні; K – коефіцієнт переведення системи відліку (з дюймів у міліметри).

$$\text{Звідси } S_T = \frac{R^2}{K^2} \cdot M^2.$$

Тоді площу січення ЗПШ знаходили за формулою

$$S_{нов} = S_T \cdot N_{p_{сер}},$$

де $N_{p_{сер}}$ – кількість точок з значеннями $p_{сер}$.

Аналогічно обчислювали площу січення часток крохмалю.

Аналізували результати експериментальних досліджень з фрагментів фотографій. Вибірково вибирали незалежні частки крохмалю, обчислюючи їх площу поперечного перерізу, а також площу січення ЗПШ навколо них. Зауважимо, що інтенсивність насичення кольорів суттєво не відрізнялася при розрахунку площі січення частки ЗПШ в об'ємі. Це свідчить про відмінність характеристик структуроутворення тіста.

Результатами досліджень підтверджено припущення авторів [115,116] про те, що при змішуванні компонентів можливе контролювання формування поверхневих шарів на межі поділу фаз з достатньо великими деформаційними процесами і з властивостями, які відрізняються від властивостей з меншими деформаціями. Експериментально встановлено, що при використанні дискретно-імпульсного дозування компонентів призводить до швидкого якісного структуроутворення тіста. Отже, можна стверджувати про суттєвий вплив на

процеси структуроутворення матриці у поверхневих шарах не лише її хімічною активністю, але й методикою проведення процесу замішування.

Вперше запропоновано новий підхід та обґрунтовано методику дослідження площі січення зовнішніх поверхневих шарів навколо часток крохмалю у процесі тістоутворення. На основі результатів оптичних досліджень та їх математичного опрацювання з використанням програмного забезпечення можна розраховувати площі січення зовнішніх поверхневих шарів навколо дисперсних часток різної фізичної природи.

5.4. Визначення динамічного процесу першої стадії тістоутворення методом термодинамічних потенціалів

Специфіка процесів перемішування рецептурних сумішей і напівфабрикатів зумовлена як властивостями сипкого компонента – борошна, так і рідкими компонентами, що містять мікроорганізми (дріжджі, молочнокислі бактерії та ін.) й активні ферменти [1]. При ударній та надмірно інтенсивній дії на таку суміш можна травмувати бактеріальну культуру і понизити активність її життєдіяльності. Окрім раціональних механічних дій при перемішуванні, необхідно підтримувати оптимальну температуру і структуроутворення. Така оптимізація повинна забезпечити притік живильних речовин до кліток бактерій і необхідний волого- і газообмін. Тому вибір і обґрунтування раціональних конструкцій змішувачів та їх робочих сумішей і механізму дії на них робочих органів завжди залишається актуальною темою для винахідників.

Запропоновано новий ефективний напрямок процесу замішування тіста. Даний напрямок дає можливість реалізувати дискретна безлопатева тістомісильна машина, що відноситься до типу машин циклічної дії й може бути застосована у лініях невеликої продуктивності [105]. Дана технологія дозволяє значно підвищити ефективність виконання замішування тіста в умовах стаціонарної зміни рецептури.

Для змішування сипких продуктів в основному застосовують два способи – гравітаційний та примусовий (механічний). Перший здійснюється під

дією сили тяжіння в барабаних, лоткових, а другий – в шнекових, лопатевих і дискових. Одночасний та взаємно відповідний перебіг основних процесів є серйозним фактором, що ускладнює прогнозування результатів основних технологічних операцій стадійності змішування. Для кінетичних процесів характерною є мала швидкість переходу окремих макромолекулярних структур (а також іонів та радикалів) з твердої поверхні до рідини, що визначає граничну стадію процесу. В таких процесах на інтенсивність найбільше впливають: різниця потенціалів, ефективна площа поверхні часток борошна, температура, фізико-хімічні властивості компонентів і об'єму усіх змішуваних компонентів.

Описана конструкція машини [105,115] забезпечує багатократне утворення та руйнування дисперсного потоку рідких компонентів на кожному кільцевому елементі місильної камери при зустрічному потоці газової фази (повітря). Така організація взаємодії фаз дозволяє підвищити ефективність проведення масообмінних процесів (рис.5.10).

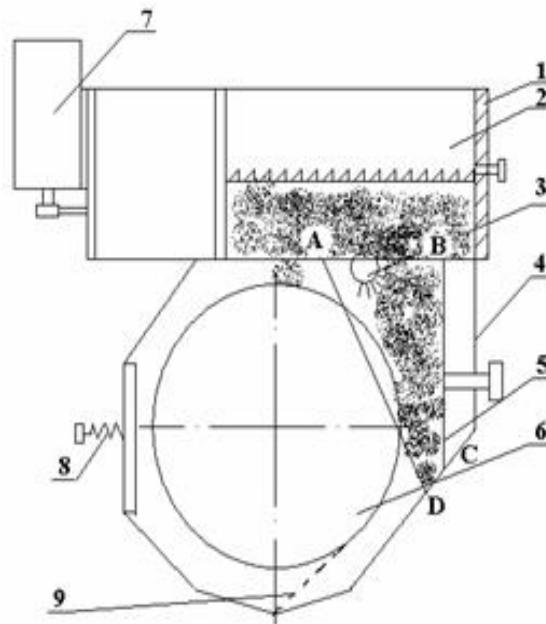


Рис. 5.10. Схема пілотного зразка: 1 – вібратор борошна; 2 – борошно; 3 – нагнітальний пристрій рідких компонентів; 4 – місильна камера; 5 – регулятивний пристрій камери відпочинку; 6 – місильний орган; 7 – електродвигун постійного струму; 8 – регулятор консистенції; 9 – шибера вивантаження тіста.

Виведення аналітичних залежностей шляху реалізації першої стадії змішування компонентів як еволюції термодинамічної системи до стану рівноваги з використанням класичного методу термодинамічних потенціалів на базі досліджень нової тістомісильної машини є напрямком у подальших конструктивних розробках. Враховуючи цілий комплекс досліджень на безлопатевій машині [105], на основі процесу першої стадії змішування, запропоновано визначення її енергоефективності, як еволюції термодинамічної системи до стану рівноваги, з використанням класичного методу термодинамічних потенціалів. Це є перехід термодинамічної системи з початкового не рівноважного стану до кінцевого рівноважного стану, який відповідає закінченню процесу змішування компонентів.

У першому наближенні дозуючі рідкі компоненти й борошно можна розглядати як однокомпонентну двофазову термодинамічну систему. Рідкі компоненти, які знаходяться в замкненому об'ємі багатогранної робочої камери машини, є рідинною фазою, другу тверду фазу складає борошно. При цьому обидві фази перебувають в одному сталому об'ємі з відповідною теплоємністю. Газова фаза (повітря) має нескінченний об'єм і, відповідно, теплоємність. Тому її параметри можна приймати постійними. Внаслідок такого процесу взаємодії компонентів, подібну систему вважаємо ізольованою термодинамічною системою.

Утворена суміш рідких компонентів має відповідну функціональну залежність хімічного потенціалу. Він залежить від вологовмісту W і температури T при заданих відхиленнях параметрів рідинної фази (T_1, P_1, μ) від рівноважних значень. Як термодинамічний потенціал модельної системи виберемо енергію Гіббса або ізобарно-ізотермічний потенціал $G=U+PV-TS$. Процес переходу даної системи до стану рівноваги необоротний і при цьому виконується умова для приросту потенціалу $dG < 0$. У стані рівноваги потенціал G матиме мінімальне значення для певних параметрів системи.

Відповідно до теорії термодинаміки, зміна термодинамічного потенціалу системи рівна «роботі всіх узагальнених сил, що діють на систему». Різниця

потенціалів між станами 1 (початок процесу змішування – гідратація) і 2 (утворення в'язко-пружного тіста) для процесу замішування фіксована й визначається тільки початковими і кінцевими станами. Тому величини роботи або відповідні енергетичні витрати на змішування визначатимуться, виходячи з шляху, за яким здійснюється еволюція системи. Цей шлях буде залежати від функціонального взаємозв'язку певного роду термодинамічних параметрів системи.

Вважаючи термодинамічні потенціали неперервними функціями своїх змінних та використовуючи рівність змішаних похідних функцій багатьох змінних, можна встановити важливі співвідношення між похідними термодинамічних змінних. Використовуючи вільну енергію при падінні компонентів, ми приймаємо, що тиск відсутній.

На основі цих положень енергетичні витрати на процес першої стадії (перехід з стану 1 у стан 2) можна записати у вигляді

$$E = \int_1^2 dG$$

З аналізу поведінки системи поблизу стану рівноваги з урахуванням роботи поверхневих сил на міжфазовій поверхні, вважаємо, що змінюється потенціал тільки першого стану. Таким чином рівняння для dG буде мати вигляд

$$dG = SdT - Vdp + md\mu - \Theta d\sigma$$

де $d\Theta$ – площа міжфазової поверхні; диференціал поверхневого натягу – $d\sigma$

У нашому випадку для борошна фазовий контакт $S = 178 \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{м}^3$ можна вважати ідеальним. Рівняння має деяку множину варіантів для його реалізації. Це пов'язано з певним відхиленням величини, що входить у рівняння рівноважних значень, $dG = 0, dG \succ 0$.

Усі величини можуть знаходитися в різній функціональній залежності від параметрів реального термодинамічного процесу. Одним із основних параметрів

першої стадії є вологовміст (кількість дозуючих рідких компонентів, w), що взаємодіє із борошном і його середньооб'ємною температурою T . У даному випадку T відіграє значну роль у процесі.

Виходячи з певних функціональних залежностей і на підставі рівняння, отримаємо модельне рівняння:

$$dG(w, T) = S(w, T)dT - V(w)dp + m(w)d\mu(w, T) - \Theta(w)d\sigma(w, T).$$

Великий інтерес викликає диференціал $d\mu(w, T)$. При постійності інших параметрів системи функція μ визначатиме умови рівноваги системи в цілому. Дана залежність для борошна визначається за експериментальними даними і є функцією вигляду

$$\mu(w, T) = K_{\mu} \cdot e^{-(K_w w + K_T T)}$$

де K_{μ} – коефіцієнт молекулярної дифузії рідких компонентів; K_T , K_w – коефіцієнт пропорційності.

$$\text{У загальному вигляді } K_{\mu} \approx \frac{Dp^2}{6\tau_0} \cdot e^{-\frac{W}{K \cdot T}},$$

де τ_0 – середній період коливань молекули біля положення рівноваги; W - енергія активації (потенціальний бар'єр); K – постійна Больцмана; T – температура, К°; D_p – діаметр частинки твердого тіла. Для борошна першого гатунку $Dp \approx 0,15$ мм.

Порівняння теоретичних значень коефіцієнтів загалом показує інтенсифікацію замішування в умовах зважувального і тонкого шару, який відбувається на великій поверхні місильного барабана.

Аналіз чисельних експериментальних даних [116,117] дозволив встановити загальну залежність між параметрами реального термодинамічного процесу тістоутворення. Слід зазначити, що величини отриманих параметрів є ефективними значеннями, що відображають кінетику складних хімічних реакцій, ускладнених процесами тепломасоперенесення. Вони можуть відрізнитися для кожного процесу залежно від властивостей борошна. Як показав

аналіз, за порядком ці дані величин збігаються з відомими літературними даними про процес тістоутворення. Все це дозволяє використовувати відповідну функціональну залежність хімічного потенціалу для розрахунку їх впливу на отримання якісного тіста.

У співвідношенні модельного рівняння (1) є експериментальні дані для компонент s, m, μ, α та $d(\Theta = 4\pi \cdot (\frac{d}{2})^2)$ отримані в процесі змішування компонентів за період першої стадії тістоутворення (табл.5.2).

$$dG(w, T) = S(w, T)dT + m(w) \cdot d\mu_w - \theta(w) \cdot d\alpha(w, T), \quad (5.9)$$

На основі даних проводимо апроксимацію складових і запишемо аналітичний вираз наближень

$$S(w, T) = -27.95 - 0.06 \cdot w + 1.14T \quad (5.10)$$

$$\alpha(w, T) = -0.49 - 0.05 \cdot w + 0.035T \quad (5.11)$$

$$m(w) = 2.3 \cdot 10^{-4} + 4.6 \cdot 10^{-5} \cdot w \quad (5.12)$$

$$d(w) = (0.83 - 12.2 \cdot \frac{1}{w}) \cdot 10^{-3} \quad (5.13)$$

$$\text{тоді } \Theta(w) = \pi(0.83 - \frac{12.2}{w})^2 \quad (5.14)$$

$$V(w) = \frac{\pi}{3} (0.83 - \frac{12.2}{w})^3 \quad (5.15)$$

$$\rho(w) = \frac{m(w)}{v(w)} \quad (5.16)$$

Таблиця 5.2

Експериментальні дані першої стадії тістоутворення

W	T	S	M	α	μ	d(мм)
20	26	0,8	0,001	0,3	$1,2 \cdot 10^3$	0,15
21	26,5	0,9	0,0012	0,31	$1,3 \cdot 10^3$	0,21
22	27	1	0,0012	0,33	$1,4 \cdot 10^3$	0,3

Продовження таблиці 5.2

23	27	1,1	0,0014	0,38	$1,8 \cdot 10^3$	0,32
25	27,5	2,1	0,0015	0,37	$1,9 \cdot 10^3$	0,4
30	28	2,9	0,0016	0,32	$2 \cdot 10^3$	0,45
40	29	2,4	0,0020	0,29	$2,1 \cdot 10^3$	0,45
60	30	2,5	0,003	0,27	$2,2 \cdot 10^3$	0,5

Якщо $d = 0,2$ мм, то має місце наближення (5.13), а, отже, і (5.14, 5.15).

У будь-якому випадку

$$\rho(w) = \frac{2.3 \cdot 10^{-4} + 4.6 \cdot 10^{-5} \cdot w}{\frac{\pi}{3} \left(0.83 - \frac{12.2}{w}\right)^3} - \text{густина.} \quad (5.17)$$

Знайдемо w із (5.13), при якому $d = 0,2$ мм, розв'язавши рівняння:

$$0,2 \cdot 10^{-3} = 0,83 - \frac{12.2}{w},$$

Отримали, що $w = 14,7$ – нижнє допустиме граничне значення режиму $w(T)$.

Маємо також

$$\mu(w, T) = -1.2 \cdot 10^{-4} - 25.28 \cdot w + 507.51T. \quad (5.18)$$

Наведені дані досліджень дають обмеження та аналітичний зв'язок:

$$-157,8 + 1,7 \cdot T^{1,41} \leq w(T) \leq -166,1 + 2,3 \cdot T^{1,35} \quad (5.19)$$

Тоді для dw має місце $2,4 \cdot T^{0,41} dT \leq dw \leq 3,1 \cdot T^{0,35} dT$ для $w \in (20; 60)$.

Диференціал $\mu(w, T)$ шукаємо як

$$d\mu = \mu'_w \cdot dw + \mu'_T \cdot dT$$

$$d\mu \leq -25.28 \cdot 3,1 \cdot T^{0,35} \cdot dT + 507.51 dT \geq (-78.37 \cdot T^{0,35} + 507.51) dT \quad (5.20)$$

В подальшому будемо використовувати рівність у правій частині (5.19), приймаючи оцінку $w(T)$ як граничне значення оптимального режиму зміни $w(T)$.

Аналогічно для $\alpha(w, T)$ маємо

$$d\alpha = \alpha'_w \cdot dw + \alpha'_T dT$$

$$d\alpha \leq -0.005 \cdot 3.1T^{0.35} dT + 0.035 dT \geq (-0.0155T^{0.35} + 0.035) dT \quad (5.21)$$

Підставляємо в (5.9)

$$S(w, T) = S(T) = (-139.18 + 9.54T - 0.16T^2),$$

$$m(w, T) = 2.3 \cdot 10^{-4} + 4.6 \cdot 10^{-5} (-1.66 + 2.3T^{1.35}) = -1.44 \cdot 10^{-3} + 1.06 \cdot 10^{-4} T^{1.35}$$

$$\Theta(w) = \Theta(T) = \pi(0.83 - \frac{12.2}{-66.1 + 2.3T^{1.35}}) = \frac{\pi}{10^6} (0.83 + \frac{12.2}{2.3T^{1.35} - 166.1})^2.$$

Отримуємо звичайне диференційоване рівняння відносно змінної T .

$$dG = G'_w \cdot dw + G'_T \cdot dT$$

$$G'_w = G'_T \frac{dT}{dw} = G'_T \frac{1}{w'_T} = G'_T \frac{1}{3.1T^{0.35}} dT$$

$$dG = G'_T (\frac{1}{3.1T^{0.35}} + 1) dT$$

$$\begin{aligned} & G'_T (\frac{1}{3.1T^{0.35}} + 1) - 139.18 + 9.54T - 0.16T^2 + \\ & + (1.06 \cdot 10^{-4} T^{1.35} - 7.41 \cdot 10^{-3}) - \frac{\pi}{10^6} (0.83 + \frac{12.2}{2.3T^{1.35} - 166.1})^2 \\ & \cdot (0.035 - 0.016T^{0.35}) \end{aligned}$$

Швидкість зміни $G(w, T)$ характеризується

$$\begin{aligned} G'_T = \frac{3.1T^{0.35}}{3.1T^{0.35} + 1} & \left[(-139.18 + 9.54T - 0.16T^2) + (1.06 \cdot 10^{-4} T^{1.35} - \right. \\ & \left. - 7.41 \cdot 10^{-3})(507.51 - 78.37T^{0.35}) - \frac{\pi}{10^6} (0.83 + \frac{12.2}{2.3T^{1.35} - 166.1})^2 \right. \\ & \left. \cdot (0.035 - 0.016T^{0.35}) \right] \end{aligned}$$

$$G \text{ шукаємо як } \int_T^T G'_T dT, \text{ тут } G_T = 0.2 \text{ М}^2.$$

Рішення рівняння (5.22), яке обґрунтовує зміну потенціалу другою методикою

$$dG(wT) = S(wT) \cdot dT + m(w)d\mu(wT) - \Theta(w)d\alpha(wT) \quad (5.22)$$

дозволяє отримати вираз

$$G(w) = \int_{20}^w \sin dw$$

Дослідження показали, що підвищення інтенсивності змішування компонентів відбудеться без збільшення затрат енергії, оскільки з підвищенням швидкості потоку зменшуються його поперечні розміри, а отже, і маса компонентів на ділянці «змішування». Потік отримує підвищену швидкість у вигляді тонкого шару, тому поверхня фазового контакту між компонентами суміші є достатньою для отримання необхідної однорідності суміші тільки за рахунок гідротаційної активності інгредієнтів. Інтегрування функції $dG(w, T)$ у заданих межах по w та T дає величину енерговитрат на процес тістоутворення для певного варіанта відхилення параметрів системи від рівноважних значень. Мінімальне значення інтеграла буде вказувати шлях реалізації процесу з найвищою енергоефективністю.

На рис. 5.11 і 5.12 показаний тривимірний графік та діаграма функції $G(w, t)$, що характеризує залежність зміни питомих сил взаємодії від вологості w та температури T з урахуванням залежності для $d\sigma(w, T)$ та рівноважна крива $G(t)$ процесу першої стадії.

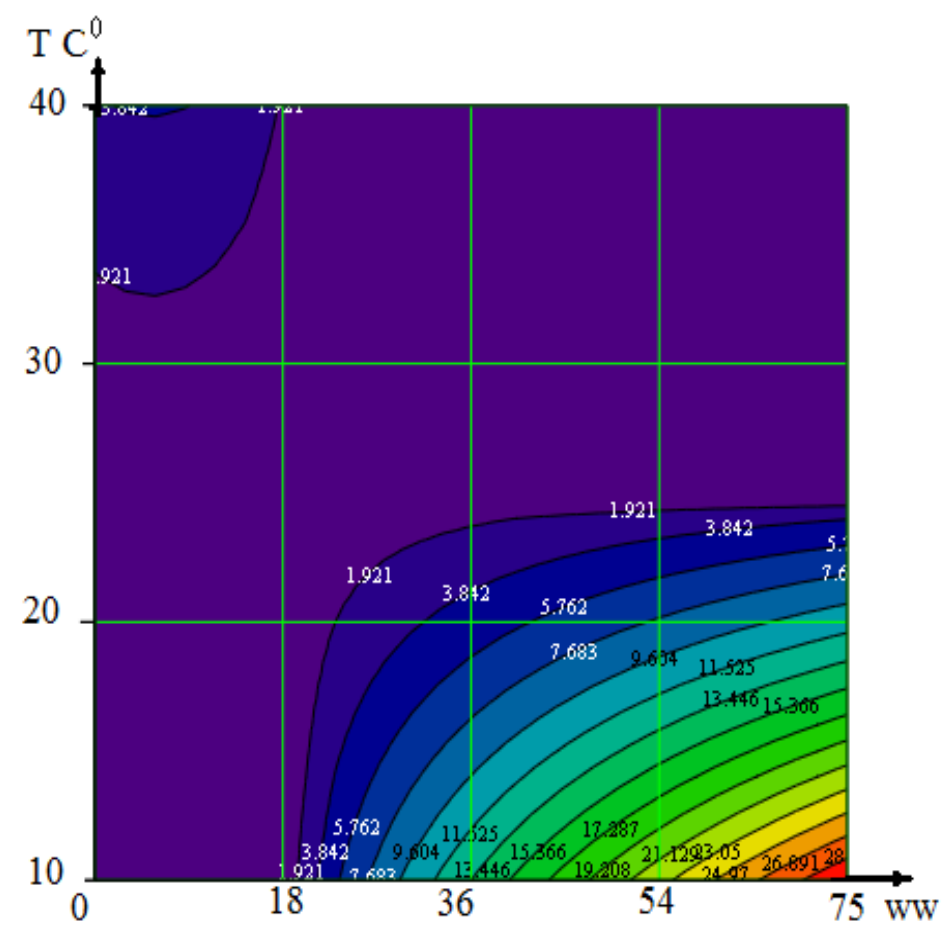


Рис.5.11. Діаграми питомих сил взаємодії поверхневих шарів відносно вологості ww та температури T

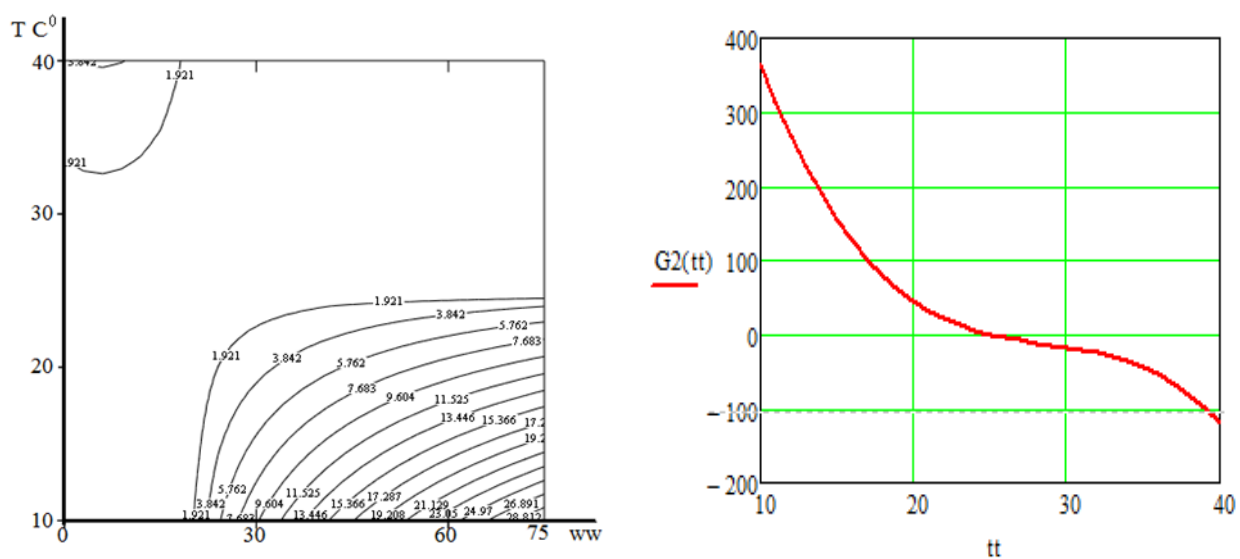


Рис. 5.12. Залежність питомих сил взаємодії від температури.

У новій тістомісильній машині дисперсність першої стадії змішування досягається в результаті вільного падіння компонентів і механічної дії місильного барабана при встановленому режимі дозування згідно з рецептурою. Тому процес утворення рідкої суміші компонентів розглядається спільно з процесом дозування, який зміщений у часі й набуває плавного неперервного характеру. Запропонований метод аналізу термодинамічної системи до стану рівноваги, з використанням класичного методу термодинамічних потенціалів у процесі тістоутворення, дозволяє проводити не тільки експертне оцінювання якості тіста на стадії його утворення, але й розробляти раціональні режими його обробки шляхом цілеспрямованої зміни процесних і технологічних факторів.

5.5. Визначення однорідності суміші компонентів при безлопатевому замішуванні

Сучасні харчові технології розвиваються в напрямках інтенсифікації технологічних процесів. Тому виникла необхідність отримання нових експериментальних даних для якісного проектування сучасних видів тістомісильного обладнання з урахуванням заповнення робочої камери, її довжини або площі контакту для забезпечення швидкої зміни концентрації.

Оскільки в дискретній безлопатевої тістомісильній машині процес замішування тіста відбувається при сприянні адгезії на першій стадії, при дискретно-імпульсному дозуванні компонентів, то така методика також безпосередньо впливає на ці перетворення (концентрацію) [1,2]. Явища адгезії на перших стадіях пояснюються теорією адсорбції й дифузії, тобто адсорбційними діями (ван-дер-ваальсових) сил на поверхні місильного барабана. За таких умов процес зумовлюється рушійною силою (різницею концентрації), площею поверхні борошна й коефіцієнтом масообміну. Оскільки концентрація борошна в рідині з часом збільшується, величина рушійної сили зменшується. У нашому випадку збільшення насичення можна досягти шляхом відносного руху борошна та рідкої фази, яку називають швидкістю обтікання [3].

Якість змішування безлопатеvim робочим органом можна оцінити за рівномірністю розподілу концентрації складників компонентів в утворювальній суміші на першій стадії тістоутворення. Для нашого процесу, як процесу неперервної дії, при введенні компонентів дискретно-імпульсним методом та механічному впливі поверхні місильного барабана у рівномірному розподілі, де частинки рухаються за законами броунівського руху й створюють умови для перемішування в псевдозрідженому шарі, застосовуємо дифузійну модель змішування [4]. Загальне рівняння зміни концентрації контрольного компонента (борошна) в суміші описується диференціальним рівнянням [3]

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -v \frac{\partial c}{\partial x} + D_L \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\bar{D}_R}{R} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \left(\frac{\partial c}{\partial R} \right), \quad (5.23)$$

де c – концентрація компонента; D_L, D_R – коефіцієнти поздовжнього та поперечного змішування; v – швидкість переміщення суміші вздовж кільцевої робочої камери; x – координата, направлена вздовж осі камери; R – радіальна координата місильного барабана.

Внаслідок співвідношення радіуса місильного барабана до його довжини робочої камери ($\frac{R}{L} \ll 1$) можна вважати, що перемішування компонентів вздовж радіальної координати відбувається набагато швидше, ніж у напрямку транспортування по замкненому контуру. Тому можна вважати, що концентрація компонента при певному значенні координати x визначається лише цією координатою і не залежить від R . У даному випадку задача стає однопараметричною і рівняння набуває вигляду

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -v \frac{\partial c}{\partial x} + D_L \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (5.24)$$

Дослідження якісних характеристик процесу змішування як правило базується на встановленні моделі реакції стандартного збурення, що описується за допомогою дельта – функції Дірака

$$p = \frac{m}{M} \delta(t) \quad (5.25)$$

де m – маса дозуючої кількості суміші компонентів на вході в робочу камеру (дільниця релаксації); M – загальна маса суміші компонентів у робочій камері машини.

Вплив початкового збурення p на неоднорідність вихідної концентрації Δc не повинен перевищувати заданого допустимого значення на відповідній стадії тістоутворення. У роботах Л.А. Вітмана, В.А. Шеймана та ін. описано зв'язок вологи з порошкоподібними, кристалічними та іншими матеріалами. Вони довели, що одночасно з збільшенням вологи в порошковому середовищі різко збільшується його тертя до робочої поверхні. Одночасно збільшуються і поверхневі сили з'єднання. Борошно є такою системою, де волога має різні форми зв'язку з твердим скелетом, що розвивається на поверхні розподілу фаз (рідина – тверде тіло) і в результаті яких достатньо міцно адсорбційно з'єднується.

Для збільшення кількості адсорбційно зв'язної вологи при перемішуванні необхідно забезпечити найбільшу взаємну рухливість компонентів, збільшити їх поверхневу активність перетворення, усунути в ній макронеоднорідність і рівномірно розподілити компоненти в об'ємі маси. Незначні коливання концентрації в межах допустимої норми можуть бути досягнуті при певних, правильних з конструктивної точки зору, значеннях габаритних розмірів робочої камери та робочого органу, введення компонентів, частоти обертання та ін. При цьому значну роль відіграє коефіцієнт заповнення робочої камери, величина зазору між рухомою поверхнею частини місильного барабана і корпусом робочої камери, зазору між поверхнею пластифікатора і місильним барабаном.

Аналіз сумарного впливу на процес змішування, згаданих вище конструктивних факторів та параметрів дискретної безлопатевої тістомісильної машини, характеризується зведеним коефіцієнтом D_L . Його збільшення інтенсифікує процес змішування і сприяє зменшенню робочої поверхні машини.

Розв'язок рівняння (5.24) проведемо за таких початкових і граничних умовах

$$\begin{aligned}
c &= 0 \text{ при } x > 0, \text{ якщо } t = 0; \\
c &= p \text{ при } x = 0, \text{ якщо } t \geq 0; \\
c &= 0 \text{ при } x = \infty, \text{ якщо } t \geq 0.
\end{aligned}
\tag{5.26}$$

Диференціальне рівняння (5.24) з граничними та початковими умовами (5.26) має розв'язок у вигляді фундаментального розв'язку рівняння параболічного типу [3]

$$c(x, t) = \frac{mx}{2M\sqrt{\pi D_L t^3}} \exp\left[-\frac{x - vt^2}{4D_L t}\right] \tag{5.27}$$

Після створеного збурення концентрації знайдемо концентрацію компонента в січенні $x = L$, тобто на виході:

$$c(x) = \frac{mL}{2M\sqrt{\pi D_L t^3}} \exp\left[-\frac{L - vt^3}{4D_L t}\right] \tag{5.27}$$

Необхідна довжина робочої камери з умови заданої дисперсії часу перебування частинок компонентів у змішуванні становить

$$L = \frac{\sqrt{2D_L t}}{S'} \tag{5.28}$$

де S' – відносна дисперсія логарифма часу перебування частинок компонентів у змішуванні в камері машини.

Представлене значення коефіцієнта поздовжнього змішування буде справедливим для теоретичного розрахунку довжини робочого профілю, що утворений робочим органом і робочою камерою. Процес змішування суміші компонентів буде відбуватись із забезпеченням необхідної якості, тобто їх нерівномірність по всьому об'єму не буде перевищувати якогось заданого значення, тому його можна представити як D_{L_0} . Теоретичне значення коефіцієнта поздовжнього змішування можна визначити за формулою

$$D_{L_0} = \frac{v^3}{4\xi^2\pi L}. \tag{5.29}$$

де μ – коефіцієнт згладжування нерівномірності концентрації контрольного компонента (борошно), що визначається

$$\xi = 0.5 \sqrt{\frac{v^3}{\pi L D_L}}$$

Конструктивні параметри машини (ДБТМ) суттєво впливають на величину D_{L_0} . Із натурних результатів експерименту на машині встановлено, що збільшення обертів робочого органу, коефіцієнта завантаження за рахунок інтенсивності дискретно-імпульсного введення компонентів збільшує концентрацію контрольного компонента в суміші. Це створює умови для еквівалентного зменшення коефіцієнта згладжування ξ і покращення процесу змішування. Цим параметрам є також граничні значення і при збільшенні їх призводить до порушення технологічного процесу в цілому.

Даний режим найефективніший, оскільки в ньому змінюється рівень концентрації, інтенсивність тепло- і масопереносу. Крім цього, дисипація енергії вихрового руху забезпечує більшу інтенсивність процесу при постійному використанні потужності.

На рух частинок у рідкій фазі істотно впливають їх розміри, в'язкість рідини і концентрація в ній твердої фази. При цьому інтенсивний рух спостерігається у нижній частині камери. Тому в умовах обмеженого руху в круговій циркуляції рідкої фази навколо місильного барабана та самої поверхні нижньої частини робочої камери створюється добре перемішуваний шар.

Перед рухом барабана в нижній частині виникають так звані носові хвилі рідкої фази, що піднімаються на певну висоту разом із місильним барабаном, що обертається. В результаті дії гравітації ці хвилі опускаються поверхнями місильного барабана та місильної камери, забезпечуючи режим протитечії. Відбувається інтенсивне перемішування компонентів. Режим протитечії є лише у випадку, коли коефіцієнт заповнення компонентами робочої камери перевищуватиме певне значення, достатнє для того, щоб суміш компонентів досягла верхньої позначки поверхні пластифікатора. Доцільно пластифікатор

виставляти при зазорі до 30мм, при якому продуктивність не зменшується, а кількість зворотно переміщеного компонента становить приблизно 15 %.

Вплив зазору можна визначити збільшенням коефіцієнта D_{L_0} у вигляді емпіричної залежності

$$D_L = D_{L_0} (1 + Ks^t) \quad (5.30)$$

де D_{L_0} – коефіцієнт змішування без урахування зазору; K – коефіцієнт впливу зазору на роботу машини, що залежить від кількості суміші компонентів, співвідношення зазору до діаметра місильного барабана тощо; s – зазор; t – показник степеневі залежності, який визначається в основному коефіцієнтом заповнення компонентами. Можна визначити й експериментальним шляхом.

Значення коефіцієнтів впливу зазору K та t визначається експериментально. Характеристика зміни компонентів та конструктивних параметрів можна вважати постійними. Збільшення коефіцієнта поздовжнього змішування D_L покращує якість процесу змішування. Це призводить до зменшення довжини циркуляції по замкненому контуру робочої камери й згладжування нерівномірності концентрації μ . Збільшення коефіцієнта D_L значно впливає на конструктивні та технологічні параметри машини, що, в свою чергу, зменшує тривалість процесу.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

На основі аналізу особливостей процесів замішування гетерогенних систем та їх апаратного забезпечення у монографії вироблено та обґрунтовано наукові положення й рекомендації, сукупність яких свідчить про нові наукові результати у виборі найраціональніших технологічних режимів і способів приготування тіста. Використаний у роботі системний підхід забезпечує комплексне розв'язання науково-технічної проблеми, спрямованої на створення високоефективного й надійного конкурентного обладнання для замішування тіста.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Аналіз конструкцій та наявних сучасних методів інтенсифікації процесу замішування тіста, а також шляхи їх модернізації у хлібопекарській галузі показав, що розв'язання проблеми підвищення якості хліба й забезпечення конкурентності на внутрішньому ринку потребує врахування сучасних тенденцій у виробничій сфері економічно розвинених країн, де використовується системний підхід до цієї проблеми. На цій основі сформульовано наукову концепцію, що ґрунтується на:

- ✓ використанні загальних характеристик замішування як способу інтенсифікації отримання однорідної маси;
- ✓ використанні основних факторів, що впливають на вимушений рух фаз гетерогенної системи, впливаючи, з одного боку, на властивості системи, а з іншого;
- ✓ на конструкцію тістомісильної техніки, що дозволяє рівномірно розподілити дисперсну фазу в гетерогенному середовищі;
- ✓ аналізі динаміки усього процесу замішування, що полягає у регулюванні оптимальними реологічними властивостями тіста.

2. Наведено класифікацію методів та засобів інтенсифікації процесу замішування. Вироблено концепція інтенсивного дискретного безлопатевого замішування тіста як засіб комплексного розв'язання проблеми підвищення

якості й оптимізації всіх необхідних стадій процесу. У розроблених конструкціях серед енергозберігаючих заходів було втілено кінематичну комбіновану схему віброзбудження плоских і просторових коливань. В якості інтенсифікуючих факторів застосовано пасивний вібраційний пристрій (пластифікатор).

3. Розроблено нові математичні моделі розрахунку поведінки дисперсної системи у нерівноважному процесі змішування та основних параметрів на основі вивчення закономірностей безлопатевого перемішування та масоперенесення в робочій камері ДБТМ.

Виконано комп'ютерне моделювання гідродинамічних процесів на всіх ділянках робочої камери і в області робочої поверхні пластифікатора (ПВП) програмним комплексом Flow Vision. Комп'ютерним моделюванням процесу замішування на ДБТМ встановлено, що застосування ПВП визначає ефективність швидкості потоку суміші компонентів при сприянні місильного барабана та поверхні циліндричної хвилеподібної камери. Показано, що ефективність використання завислого стану, дія вібрації й енергія потоку, дискретна дія стискування, нагнітання й релаксація цього потоку сприяють інтенсивному змішуванню тіста.

4. Запропоновано новий методологічний підхід до методики розрахунку поведінки дисперсних систем при нагнітанні безлопатевим робочим органом та живильним барабаном. Отримані залежності основних силових та геометричних параметрів дозволили обґрунтувати найменші енергетичні та водночас інтенсивні режими роботи валкового нагнітання при формуванні тістових напівфабрикатів.

5. Розвинено теоретичне підґрунтя щодо закономірностей перебігу процесу пластифікації тіста:

✓ розроблено методику розрахунку основних параметрів процесу пластифікації тіста пасивним вібраційним пристроєм (ПВП), що доповнює теорію стадійності замішування і поєднує послідовність визначення кінематичних, силових, адгезійних, енергетичних параметрів вібрації на рух замішувального тіста і його закономірності поглинання енергії;

✓ конструктивно виконано процес пластифікації тіста за допомогою (ПВП) пластифікатора, що створює передумови для оптимізації замішування та визначення показників якості тіста і є основою для вибору напрямків подальшого розвитку технічних засобів і раціонального апаратурного оформлення тістомісильних машин;

✓ доведено, що поверхня ПВЗ є інструментом регулювання поведінки утворювального тіста з найрізноманітнішими структурно-механічними характеристиками. Встановлено, що дискретність її дії на тісто забезпечує максимальну гомогенізацію його структури і густину. Для забезпечення якісної, без розривів і кратерів поверхні хліба, стискуваність тіста доцільно обмежувати до 0.1 МПа.

6. Визначено основні закономірності залежності реологічних властивостей тіста від параметрів замішування в ДБТМ. Показано, що механічне перемішування й багаторазове стискування тіста поліпшує структуру пористості, газотримуючі й газотворні властивості, сприяє збільшенню об'єму хліба на 10 – 12% і свіжості м'якушки, а також вищому рівню збереження харчової цінності хліба (до 72 годин). Дотримання співвідношення між газоподібним і розчинним в утворювальному тісті CO_2 при тиску від 90 до 1 кПа є однією з причин спущування його на виході з профільного каналу, що сприяє скороченню тривалості бродіння до 35 – 40 хв. Обраний режим замішування при зазорі $\delta=30$ мм і $n=1.67 \text{ сек}^{-1}$ дозволяє скоротити втрати сухих речовин при бродінні й вистоюванні до 22%, збільшити вихід готової продукції на 7 – 11%.

Список використаної літератури

1. Агатова А.И. О сульфидрильных группах и дисульфидрильных связях в белках пшеничной муки [Текст] / А. И., Н. И. Проскуряков // Биохимия. – 1962. – Т.27. – № 1. – С. 88 – 93.
2. Азаров Б.М. Выбор метода изучения реологических характеристик [Текст] / Азаров Б.М., Назаров Н.И. // Реологические характеристики пищевых продуктов и полуфабрикатов. Обзор – М.: ЦНИИТЭИпищепром. – 1971. – С. 3 – 8.
3. Азаров, Б.М. Реология пищевых масс. Лабораторный практикум [Текст] / Азаров Б.М., Назаров Н.И. – М.: Издательство МТИПП, 1970. – 90 с.
4. Азаров, Б.М. Технологическое оборудование пищевых производств [Текст] / Азаров Б.М., Аурих Х., Дичев С. и др. – М.: Агропромиздат, 1988. – 463 с.
5. Азаров, Б.М. Технологическое оборудование хлебопекарных и макаронных предприятий [Текст] / Б.М. Азаров, АТ. Лисовенко, С.А. Мачихин и др.; Под ред. С.А. Мачихина. – М.: Агропромиздат, 1986. – 263 с.
6. Аксенова, Л.М. Структурно-реологические свойства бисквитно-сбивного сдобного теста [Текст] / Аксенова Л.М., Талейсник М.А., Урьев Н.Б. // Хлебопекарная и кондитерская промышленность. – 1977. – № 4. – С. 35 – 36.
7. Александров, А.В. Основы теории упругости и пластичности [Текст] / Александров А.В., Потапов В.Д. – М.: Высшая школа, 1990. – 400 с.
8. Амелин, В.Г. Реологические свойства пшеничного теста при брожении [Текст] / Амелин В.Г. // Известия Вузов. Пищевая технология. – 1981. – № 6. – С. 132 – 133.
9. Амирасланова, Н.И. Влияние длительности интенсивного замеса жидкой опары на кинетику брожения [Текст] / Амирасланова Н.И.,

- Сидоренко С.И., Лисовенко А.Т. // Хлебопекарная и кондитерская промышленность. – 1987. – № 3. – С. 35 – 37.
10. Антипов, С.Т. Машины и аппараты пищевых производств. В 2 кн. Кн.1 [Текст] / С.Т. Антипов, И.Т. Кретов, А.Н. Остриков и др.; Под ред. В.А. Панфилова. – М.: Высшая школа, 2001.
11. Арет, В.А. Течение пралиновых масс в цилиндрических формующих каналах [Текст] / Арет В.А., Мачихин Ю.А. // Хлебопекарная и кондитерская промышленность. – 1967. – № 5. – С. 25 – 27.
12. Ауэман, Л.Я. Определение качества клейковины на пенетрометре [Текст] / Ауэман, Л.Я. // Известия вузов. Пищевая технология. – 1959. – № 6. – С. 115 – 122.
13. Ауэман, Л.Я. технология хлебопекарного производства [Текст] / Ауэман, Л.Я. // 7 – е изд. перераб. и доп. – М.: Пищевая промышленность. – 1972. – С. 512.
14. Басов, Н.И. Расчет и конструирование оборудования для производства и переработки полимерных материалов [Текст] / Басов Н.И., Казанков Ю.В., Любартович В.А. – М.: Химия, 1986. – 488 с.
15. Белкин, И.М. Ротационные приборы. Измерение вязкости и физико-механических характеристик материалов [Текст] / Белкин И. 66М., Виноградов Г.В. – М.: Машиностроение, 1968. – 272 с.
16. Берзина, Н.И. Биохимические изменения белково-протеиназного комплекса в пшеничных опарах и тесте [Текст] / Берзина Н.И., Коваленко А.Я., Ройтер И.М. // Известия вузов. Пищевая технология. – 1962. – № 2. – С. 49 – 54.
17. Берзина, Н.И. Биохимические изменения углеводно-амилазного комплекса в пшеничных опарах и тесте [Текст] / Берзина Н.И., Коваленко А.Я., Ройтер И.М. // Известия вузов. Пищевая технология. – 1962. – № 1. – С. 35 – 41.
18. Бибик, Е.Е. Реология дисперсных систем [Текст] / Бибик Е.Е. – Л.: Издательство Ленинградского университета, 1981. – 172 с.

- 19.Блокома, А.Х. Основные понятия о свойствах теста [Текст] / Блокома А.Х., Глинка И. // М.: Наука. – 1968. – С. 583.
- 20.Блуашвили, Т.Г. Динамика структурно-механических свойств кремовых конфетных масс при сбивании [Текст] / Блуашвили Т.Г., Чувахин С.В., Благовещенский И.Г., Чижикова Г.А. // Хлебопекарная и кондитерская промышленность. – 1983. – № 3. – С. 37 – 39.
- 21.Васин, М.И. Изменение реологических свойств теста при внесении в него молочной сыворотки [Текст] / Васин М.И., Малышева А.В., Волкова Л.Д. // Хлебопекарная и кондитерская промышленность. – 1986. – № 7. – С. 34 – 36.
- 22.Васина, А.Ф. Реологические и адгезионные свойства пшеничного теста в зависимости от «силы» муки [Текст] / Васина А.Ф., Зимон А.Д., Иоффе С.М., Энкина Л.С. // Известия Вузов, Пищевая технология. – 1987. – №3. – С. 38–40.
- 23.Васина А.Ф. Факторы, влияющие на течение хлебного теста [Текст] / Васина А.Ф., Зимон А.Д., Иоффе С.М., Энкина Л.С. // Известия Вузов, Пищевая технология. – 1986. – № 4. – С. 25 – 27.
- 24.Вдовиченко, А.С. Структурно-механические свойства и качество сдобных сухарей [Текст] / Вдовиченко А.С., Сысоев И.А., Ройтер И.М., Руденко-Грицюк О.А. // Хлебопекарная и кондитерская промышленность – 1980. – № 1. – С. 25 – 26.
- 25.Галлагер, Г. Метод конечных элементов. Основы / Пер. с англ [Текст] / Галлагер Г. – М.: Мир, 1984. – 428 с.
- 26.Ганин, В.В. Реология процесса формования экструзией изделий из теста с начинками [Текст]: Дис. канд. техн. наук: 05.18.12 / Ганин В.В. – М., 1985. – 243 с.
- 27.Гейштор, В.С. Регулирование температуры полуфабрикатов и теста в тестоприготовительном оборудовании [Текст] / Гейштор В.С. // Хлебопекарная и кондитерская промышленность. – 1983. – № 11. – С. 36 – 37.

28. Горячева, А.Ф. Механическая обработка теста [Текст] / Горячева А.Ф., Щербатенко В.В. – ЦИНТИПищепром, 1968. – 36 с.
29. Горошко М.К. Машины и агрегаты для приготовления теста [Текст] / Горошко М.К. / – М.: Пищепромиздат, 1963. – 147 с.
30. Горячев, А.Ф. Влияние механической обработки теста при его замесе на качество хлеба [Текст] / Горячев А.Ф., Щербатенко В.В. // Хлебопекарная промышленность. – 1961. – № 3. – С. 1 – 5.
31. Горачев, Ю.П. Математические методы планирования экспериментов [Текст] / Горачев Ю.П. // Пищевая Промышленность. – 1979. – С. 199.
32. Гришин, А.С. Влияние различных способов тестоприготовления на качество хлеба [Текст] / Гришин А.С., Энкина Л.С. // – М.: Пищевая промышленность. – 1974 – С. 112.
33. Гришин, А.С. Внедрение прогрессивной технологии тестоприготовления на хлебозаводах [Текст] / Гришин А.С., Энкина Л.С. // – М.: ЦНИИТЭИпищепром. – 1971. – С. 36.
34. Гришин, А.С. Исследование реологических свойств теста [Текст] / Гришин А.С., Цирульников В.Д., Энкина Л.С. – М.: ЦНИИТЭИпищепром, 1971. – 36 с.
35. Гулий, І.С. Обладнання підприємств переробної та харчової промисловості [Текст] / Гулий І.С., Пушанко М.М., Орлов Л.О. та ін. – Вінниця: Нова книга, 2001. – 576 с.
36. Гуць, В.С. Прикладна реологія та інтенсифікація процесів харчових виробництв [Текст]: Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.18.12 /УДУХТ/ Гуць В. С. – К., 1999. – 36 с.
37. Дикий, Н.А. Основы научных исследований [Текст] / Дикий Н.А., Халатов А. А. – К.: Вища школа, 1985. – 224 с.
38. Драгилев, А.И. Устройство и эксплуатация оборудования предприятий пищевой промышленности [Текст] / А.И. Драгилев, Ц.Р. Зайчик, В.Ф. Коломиец и др. / Под ред. А.И. Драгилева. – М.: Пищевая промышленность, 1979. – 304 с.

- 39.Дятлов, В.А. Реологические и адгезионные свойства теста сдобных и булочных изделий [Текст]: дис. канд. техн. наук: 05.18.12 / Дятлов В.А. – Воронеж, 1982. – 207 с.
- 40.Елисеева, С.И. Контроль качества сырья и готовой продукции на хлебозаводах [Текст] / Елисеева С.И. // – М.: Агропромиздат. – 1987. – С. 192.
- 41.Ермолов, А.Ю. Влияние вибрации на производительность одношнековой формующей машины и качество выпрессованных жгутов из конфетных масс [Текст] / Ермолов А.Ю. – М.: ЦНИИТЕИ: Пищевая промышленность. Серия 3. Кондитерская промышленность. – 1982. – С.14 – 15.
- 42.Измайлова, Б.Н. Структурообразование в белковых системах [Текст] / Измайлова Б.Н., Ребиндер П.А. // – М.: Наука. – 1974. – С. 268.
- 43.Иванов, В.С. Пути снижения адгезии теста [Текст] / Иванов В.С., Калинина С. М., Благовещенский И.Г. // Хлебопекарная и кондитерская промышленность. – 1983.–№11. – С. 36 – 37.
- 44.Игнатенко, В.В. О сжимаемости теста [Текст] / Игнатенко В.В., Мачихин С.А., Михайленко В.Г. // Хлебопекарная и кондитерская промышленность. – 1972. – № 2. – С. 8 – 11.
- 45.Иоффе, С.М. Адгезия вязкоупруго-пластичных тел на примере хлебного теста [Текст]: дис. канд. техн. наук: 02.00.11 / Иоффе С.М. – М., 1987. – 227 с.
- 46.Казанская, Л.Н. Перспективы применения рН-материи для контроля кислотности полуфабрикатов и хлеба [Текст] / Казанская Л.Н., Лопашева Е.В., Логинова И.М. и др. // – М.: ЦНИИГЭИпищепром. – 1971. – С. 24
- 47.Ковбаса, В.Н. Влияние интенсивного замеса на степень созревания жидких опар [Текст] / Ковбаса В.Н., Лисовенко А.Т., Березина Н.И. // Хлебопекарная и кондитерская промышленность. – 1981. – № 3. – С. 37 – 38.

- 48.Ковбаса, В.Н. Влияние различных факторов на удельный объем пшеничного хлеба [Текст] / Ковбаса В.Н., Лисовенко А.Т., Ташмухамедова Г.К // В кн.: Хлебопекарная, макаронная, дрожжевая промышленность. М.: ЦНИИЕЭПищепром, – 1981. Вып. 6. – С. 9 – 10.
- 49.Ковбаса, В.Н. Исследования воздуха жидкой опары во время интенсивного замеса [Текст] / Ковбаса В.Н., Лисовенко А.Т., Престула Н.В. // М.: ЦНИИЕЭПищепром, – 1980. Вып. 9. – С. 30 – 31.
- 50.Ковалёв, А.В. Влияние температуры и плотности теста и мякиша хлеба на их теплофизические характеристики [Текст] / Ковалёв А.В., Теличкун В.И., Пахомов В.Н. // Пищевая промышленность. – 1988. – № 4. – С. 44 – 55.
- 51.49. Козымина, Н.П. Биохимия зерна и продуктов его переработки [Текст] / Козымина Н.П. // М.: Колос, 1976. – С. 375.
- 52.Козлов, Г.Ф. Влияние вида деформации теста при замесе на его реологические свойства [Текст] / Козлов Г.Ф., Бражник А.М., Пшенишнюк Г. Ф. // Известия Вузов, Пищевая технология. – 1984. – № 3. – С. 39 – 41.
- 53.Кононюк, А.Е. Справочник конструктора оборудования пищевых производств [Текст] / Кононюк А.Е., Басанько В.А. – К.: Техніка, 1981. – 319 с.
- 54.Корчагин, В.И. Применение в хлебопечении временно активированной воды [Текст] / Корчагин В.И., Демченко В.И., Дерканосова Н.М., Столярова Л.И., Карпенко В.И. // Хлебопечение России. – 2000. – № 5. – С. 16 – 17.
- 55.Кретов, И.Т. Технологическое оборудование предприятий пищекопцентратной промышленности [Текст] / Кретов И.Т., Кравченко В.М., Остриков А.Н. – Воронеж: И-во ВГУ, 1996. – 448 с.
- 56.Кулен, Р.В. Математическое программирование (с элементами информационных технологий) [Текст] / Кулен Р.В., Юнькова Е.А., Жальцов А.Б. – К.: МАУП, 2000. – 124 с.

- 57.Кульман, А.Г. Коллоиды в хлебопечении [Текст] / Кульман А.Г. – М.: Пищепромиздат, 1953. – 247 с.
- 58.Кузьминский, Р.В. Технологический эффект интенсивного замеса теста [Текст] / Кузьминский Р.В., Щербатенко В.В., Щербатенко В.А., Пташкин В.Л. и др. // Хлебопекарная и кондитерская промышленность. – 1979. № 1. – С. 23 – 25.
- 59.Лисовенко, А.Т. Технологическое оборудование хлебозаводов и пути его совершенствования [Текст] / Лисовенко А.Т.– М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 208 с.
- 60.Лісовенко, О.Т. Технологічне обладнання хлібопекарських і макаронних виробництв [Текст] / Лісовенко О.Т., Руденко-Грицюк О.А., Литовченко І.М. та ін. – К.: Наукова думка, 2000. – 283 с.
- 61.Лісовенко, О.Т. Відпрацювання раціонального режиму в робочій камері тістомісильної машини з метою оптимізації робочого процесу і якості тіста [Текст] / Лісовенко О.Т., Стадник І.Я., Доломакін Ю.Ю. // Наукові проці Українського державного університету харчових технологій. – К.: УДУХТ, 2001. – № 10. – С. 111.
- 62.Лісовенко, О.Т. Пат. 62460 А Україна. Тістомісильна машина [Текст] / Лісовенко О.Т., Котенко А.Г., Стадник І.Я. // Заявл. 27.03.03; Опубл. 15.12.03, Бюл. – № 12. – С. 2.
- 63.Лісовенко, О.Т. Створення сучасної експериментальної установки тістомісильної машини і її експериментальної моделі [Текст] / Лісовенко О.Т., Доломакін Ю.Ю., Стадник І.Я. // Тези 67-ї наукової конференції молодих вчених, аспірантів і студентів (24 – 25 квітня 2001 р). – Ч П. – Київ: НУХТ, 2001. – С. 53.
- 64.Лісовенко, О.Т. Специфіка визначення реологічних характеристик для обґрунтування розрахунків тістомісильних машин [Текст] / Лісовенко О.Т., Стадник І.Я. // Тези 68-ї наукової конференції молодих вчених, аспірантів і студентів “Сучасні методи створення нових технологій

- та обладнання в харчовій промисловості” (23 – 25 квітня 2002 р). – Ч П. – Київ НУХТ, 2002. – С. 48.
- 65.Лісовенко, О.Т. Сучасні порційні тістомісильні машини для інтенсифікації замішування [Текст] / Лісовенко О.Т., Доломакін Ю.Ю., Стадник І.Я. // Тези 69-ї наукової конференції молодих вчених, аспірантів і студентів “Розроблення, дослідження і створення продуктів функціонального харчування, обладнання та нових технологій для харчової і переробної промисловості” (22 – 24 квітня 2003 р). – Ч П. – Київ: НУХТ, 2003. – С. 53.
- 66.Лісовенко, О.Т. Дослідження процесу інтенсифікації замішування тіста і обґрунтування нових конструктивних рішень [Текст] / Лісовенко О.Т., Доломакін Ю.Ю., Стадник І.Я. // Тези 70-ї наукової конференції молодих вчених, аспірантів і студентів “Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у ХХІ столітті” (20-21 квітня 2004 р). – Ч П. – Київ: НУХТ, 2004. – С.
- 67.Лисовенко, А.Т. Перемещение влаги в тесте хлебе при выпечке [Текст] / Лисовенко А.Т., Сидоренко С.И. // Хлебопекарная и кондитерская промышленность. – 1972. № 8. – С. 4 – 9.
- 68.Лисовенко, А.Т. Расчет математических моделей тестомесильного процесса с помощью ЭВМ ЕС – 1022 [Текст] / Лисовенко А.Т., Сидоренко С.И., Литовченко И.Н., Боярчук В.А. // Хлебопекарная и кондитерская промышленность. – 1984. № 5. – С. 33 – 34.
- 69.Лонцин, М. Основные процессы пищевых производств [Текст] / Лонцин М., Мерсон Р. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1983. – 384 с.
- 70.Магомедов, Г.О. Оценка влияния пластичности конфетных масс на перепад давления в цилиндрическом канале, имеющем входной криволинейный конический профиль [Текст] / Магомедов Г.О., Журавлев А.А., Колодежнов В.Н. // Известия вузов. Пищевая технология. – 2000. – № 5 – 6. – С. 72 – 75.

- 71.Мазур, П.Я. Вода в приготовлении хлеба [Текст] / Мазур П.Я., Яншева И.Н., Выставкин А.А. // Хлебопечение России. – 2000. – № 6. – С. 30 – 32.
- 72.Маршалкин, Г.А. Технологическое оборудование кондитерских фабрик [Текст] / Маршалкин Г.А. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 448 с.
- 73.Мачихин, Ю.А. Инженерная реология пищевых материалов [Текст] / Мачихин Ю.А., Мачихин С.А. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 216 с.
- 74.Мачихин, Ю.А. Реометрия пищевого сырья и продуктов: Справочник / Ю.А. Мачихин, А.В. Горбатов, А.С. Максимов и др. [Текст] / Под ред. Ю.А. Мачихина. – М.: Агропромиздат, 1990. – 272 с.
- 75.Мачихин, Ю.А. Современные способы формования конфетных масс [Текст] / Мачихин Ю.А., Клаповский Ю.В. – М.: Пищевая промышленность, 1974. – 184 с.
- 76.Мачихин, Ю.А. Структурно-механические свойства конфетной массы трюфелей [Текст] / Мачихин Ю.А., Чувахин С.В., Карпин Б.А. // Хлебопекарная и кондитерская промышленность. – 1976. – № 9. – С. 34 – 35.
- 77.Мачихин, Ю.А. Структурно-механические свойства конфетных масс [Текст] / Мачихин Ю.А., Корячкин В.П., Клаповский Ю.В. // Хлебопекарная и кондитерская промышленность. – 1975. – № 8. – С. 22 – 24.
- 78.Мачихин, Ю.А. Формование пищевых масс [Текст] / Мачихин Ю.А., Берман Г.К., Клаповский Ю.В. – М.: Колос, 1992. – 272 с.
- 79.Медведев, Г.М. Рациональная технология переработки некондиционного хлеба [Текст] / Медведев Г.М., Фрейдин А.А., Белоусов Г.С. // Пищевая промышленность. – 1996. – № 10. – С. 46.
- 80.Михайлов, Н.В. Исследования полных реологических кривых и формулы расчета эффективной вязкости структурированных жидкостей с

- молекулярно-кинематической интерпретацией входящих в них членов [Текст] / Михайлов Н.В., Лихгейм А.М. // Коллоидный журнал. – 1955. Т. 17. – № 5. С. 364 – 379.
81. Назаров Н.И. Общая технология пищевых производств [Текст] / Н.И. Назаров, А.С. Гинзбург, С.М. Гребенюк и др. / Под ред. Н.И. Назарова. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 360 с.
82. Назаров, Н.И. Роль давления при прессовании макаронного теста [Текст] / Назаров Н.И., Манкеева Н.А. // Известия Вузов, Пищевая технология. – 1968. – № 6. – С. 7 – 8.
83. Николаев, Б.А. Структурно-механические свойства мучного теста [Текст] / Николаев Б.А. – М.: Пищевая промышленность, 1976. – 247 с.
84. Пастер, Л. Исследования о брожениях [Текст] / Пастер Л. // – М. – Л.: Сельхозгиз. – 1973. – С. 487.
85. Прокопенко, Н.Ф. Определение степеней механической обработки теста [Текст] / Прокопенко Н.Ф., Соболев Л.Л. // Хлебопекарная и кондитерская промышленность. – 1961. – № 12. – С. 11 – 14.
86. Пучкова, Л.Н. Лабораторный практикум по технологии хлебопекарного производства [Текст] / Пучкова Л.Н. // – М.: Пищевая промышленность. – 1971. – С. 191.
87. Пшенишнюк, Г.Ф. Оценка эффективности замеса пшеничного теста [Текст] / Пшенишнюк Г.Ф., Козлов Г.Ф. // Хлебопекарная и макаронная промышленность. – М.: ЦНИИТЭИпищепром. – 1980. – Вып. 4. – С. 37 – 39.
88. Патент на корисну модель № 21204. Тістомісильна машина [Текст] / І.Я. Стадник, О.Т. Лісовенко (Україна); МКИ²¹A21C; Заявл. 20.11.06; Опубл. 15.03.07.
89. Патент на корисну модель № 25269. Тістомісильна машина [Текст] / І.Я. Стадник, О.Т. Лісовенко (Україна); МКИ²¹A21C; Заявл. 20.02.07; Опубл. 10.08.07

90. Патент на корисну модель № 34840. Тістомісильний орган [Текст] / І.Я. Стадник. (Україна); МКИ²¹ А21С; Заявл. 15.03.08; Опубл. 26.08.08
91. Пат. 3136211 Россия, МКИ А21С 3/04 Способ непрерывной и нормируемой подачи хлебного теста и устройство для его осуществления [Текст] / Торахико Хаяси (Япония); Реон Аутоматик Машинери Ко, Лтд. – № 97108098/13; Заявл. 21.05.97; Опубл. 20.02.99, Бюл. № 5. – 4 с.
92. Патент на корисну модель № 44751. Пристрій для визначення реологічних властивостей тіста [Текст] / І.Я. Стадник. (Україна); ТНТУ імені Івана Пулюя; Заявл. 10.04.09; Опубл. 12.10.09р. Бюл. № 19
93. Пащенко, Л.П. Интенсификация биотехнологических процессов в хлебопечении [Текст] / Пащенко Л.П. – Воронеж: И-во ВГУ, 1991. – 205 с.
94. Петросян, Г.Л. Применение метода конечных элементов к задачам обработки давлением порошковых пористых тел // Реологические модели и процессы деформирования пористых порошковых и композиционных материалов [Текст] / Петросян Г.Л. – К.: Наукова думка. – 1985. – 159 с.
95. Погонцева Э.И. Реологические свойства жележных масс [Текст] / Погонцева Э.И., Карнаушенко Л.И., Чмырь А.Д. // Хлебопекарная и кондитерская промышленность. – 1981. – № 3. – С. 41 – 42.
96. Протопопов, Д.Н. Формование тестовых заготовок методом соэкструзии [Текст]: дис. канд. техн. наук: 05.18.12 / Протопопов Д.Н. – М., 1986. – 185 с.
97. Пшенишнюк, Г.Ф. Теоретический анализ изменения плотности тестообразных масс при брожении [Текст] / Пшенишнюк Г.Ф., Козлов Г.Ф. // Известия вузов. Пищевая технология. – 1991. – № 1 – 3. – С. 119 – 122.
98. Райхштадт, Л.И. Переработка черствого и деформированного хлеба [Текст] / Райхштадт Л.И., Мухамедов Х.Р. – М.: ЦНИИТЭИ Минхлебопродуктов СССР, 1989. – 28 с.

99. Ребиндер, П.А. Физико-химическая механика дисперсных структур в химической технологии [Текст] / Ребиндер П.А., Урьев Н.В., Щукин Е.Д. – М.: АН СССР, 1960. – 256 с.
100. Рейнер, М. Реология: Пер. с англ [Текст] / Рейнер М. – М.: Наука, 1965. – 224 с.
101. Ройтер, И.М. Изменение реологических свойств полуфабрикатов в процессе выработки хлебных палочек [Текст] / Ройтер И.М., Неделина Л.Н., Бурковская Н.А. // Хлебопекарная и кондитерская промышленность. – 1981. – № 10. – С. 31 – 33.
102. Романков, П.Г. Гидромеханические процессы химической технологии [Текст] / Романков П.Г., Курочкина М.И. – Л.: Химия, 1982. – 288 с.
103. Сандул, О.О. Математичне моделювання процесу формування тіста екструзією [Текст] / Сандул О.О., Штефан Є.В., Теличкун Ю.С., Теличкун В. І. // Харчова промисловість. – 2001. – вип.46. – С. 95 – 98.
104. Стренк, Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками [Текст] / Стренк Ф. // Л.: Химия – 1957. – С. 383.
105. Стадник І.Я. Процеси першої стадії замішування на новій тістомісильній машині [Текст] / І.Я. Стадник // Вісник ТДТУ: № 2. Т. 14. 2009. С. 72 – 79.
106. Стадник І.Я. Науково – технічні основи процесів та розробка обладнання для безлопатевого замішування тіста. Автореферат док. дисертації. 2013р., 42 С.
107. Процеси та машини для замішування тіста [Текст] / І.Я. Стадник, О.Т. Лісовенко // Тернопіль: видавництво ТНТУ ім. І. Пулюя 2011. – 212 с.
108. Стадник І.Я. Тістомісильна машина безперервної та періодичної дії [Текст] / І.Я. Стадник, О.Т. Лісовенко // Хранение и переработка зерна. 2008. № 2. С. 51 – 52.
109. Стадник І.Я. Шляхи зниження енергозатрат при замішуванні тіста [Текст] / І.Я. Стадник // Вісник ТДТУ – 2008. – № 1. С. 110 – 114.

110. Стадник І.Я. Розрахунок колової швидкості в тістомісильній машині періодичної дії. [Текст] / І.Я. Стадник, В.Ф. Федів // Вісник ТДТУ – 2008. – № 4. С. 61 – 67.
111. Стадник І.Я. Тістомісильна машина безперервної та періодичної дії / [Текст] І.Я. Стадник, О.Т. Лісовенко // Хранение и переработка зерна. 2008. № 2. С. 51 – 52.
112. Стадник І.Я. Пристрій для визначення реологічних властивостей тіста. [Текст] / І.Я. Стадник, О.Т. Лісовенко, В.Ф. Федів // Хранение и переработка зерна. – 2008. № 11. С. 57 – 58.
113. Стадник І.Я. Застосування способів вібраційного та пульсаційного замішування при розробці нової тістомісильної машини [Текст] / І.Я. Стадник, О.Т. Лісовенко // Хлібопекарська і кондитерська промисловість України. 2009. № 4. С. 37 – 40.
114. Стадник І.Я. Деякі теорії процесу першої стадії замішування на новій тістомісильній машині / І.Я. Стадник // ОНАХТ. Наукові праці. № 35. Т 2. – 2009. С. 149 – 152.
115. Стадник І.Я. Прогнозування якості процесу замішування на новій тістомісильній машині [Текст] / І.Я. Стадник // Сільськогосподарські машини: Збірник наукових статей. 2009. № 18. С. 451 – 460.
116. Стадник І.Я. Процеси першої стадії замішування на новій тістомісильній машині [Текст] / І.Я. Стадник // Вісник ТДТУ: №2. Т. 14. 2009. С. 72 – 79.
117. Стадник І.Я. Процеси другого періоду першої стадії замішування на новій тістомісильній машині [Текст] / І.Я. Стадник // Вісник ТДТУ. № 3. Т. 14. 2009. С. 81 – 85.
118. Стадник І.Я. Основи теорії пластифікації тіста [Текст] // Хлібопекарська і кондитерська промисловість України. 2009. № 5. С. 22 – 23.
119. Стадник І.Я. Вплив адгезії тіста на процес замішування [Текст] / І.Я. Стадник, О.Т. Лісовенко // Науковий журнал, Вісник Східноукраїнського університету імені Володимира Даля: 2010. С. 52 – 58.

120. Стадник І.Я. Дозатор рідких компонентів [Текст] / І.Я. Стадник, О.В. Ковальов, В.В. Шутюк, Л.І. Удворгелі // НУХТ. 2010. № 33. С. 78 – 80.
121. Стадник І.Я. Порівняння основних показників сучасних тістомісильних машин вітчизняних, європейських, американських та інших країн світу [Текст] / І.Я. Стадник // Хлібопекарна і кондитерська промисловість України. 2010. № 7 – 8.
122. Стадник І.Я. Обґрунтування процесу пластифікації на тістомісильній машині [Текст] / І.Я. Стадник, О.Т. Лісовенко // Хранение и переработка зерна. 2010. № 5. С. 52 – 53.
123. Стадник І.Я. Розробка експериментального стенду для визначення тиску на поверхні пластифікатора з інтегрованою програмою “Power Graph” [Текст] / І.Я. Стадник, Д.М. Даниилишин // Хранение и переработка зерна. 2010. № 7. С. 46 – 50.
124. Стадник І.Я. Моделювання руху змішуваних компонентів у камері безлопатевої тістомісильної машини [Текст] / І.Я. Стадник, М.М. Луців // Хранение и переработка зерна. 2011. № 2. С. 58 – 60.
125. Стадник І.Я. Процес замішування на безлопатевій тістомісильній машині можна регулювати. [Текст] / І.Я. Стадник, В.М. Олійник // Хлібопекарна і кондитерська промисловість України. 2011. № 5. С. 5 – 7.
126. Стадник І.Я. Теоретична модель розрахунку витрат потужності під час пластифікації тіста. [Текст] / І.Я. Стадник // Хранение и переработка зерна. 2011. № 5. С. 48 – 50.
127. Добротвор І.Г. Дослідження розподілу концентрацій розчинних шарів при змішуванні. [Текст] / І.Г. Добротвор, І.Я. Стадник // Хранение и переработка зерна. 2011. № 8. С. 48 – 50.
128. Стадник І.Я. Розподілення концентрацій розчинних шарів при замішуванні [Текст] / І.Я. Стадник // Матеріали дванадцятої наукової конференції ТДТУ імені І. Пулюя – 2008. – 232 с.
129. Лісовенко О.Т. Новий спосіб замішування тіста / О.Т. Лісовенко, І.Я. Стадник [Текст] // Науково-практична конференція «Новітні

технології, обладнання, безпека та якість харчових продуктів:сьогодення та перспективи» Національний університету харчових технологій. – К.: НУХТ. – 2010. № 10. С. 28.

130. Стадник І.Я. Автоматизація нової тістомісильної машини [Текст] / І.Я. Стадник, В.В. Васильків // Міжнародна науково-технічна конференція "Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій" ТНТУ імені І. Пулюя. 2010. С. 103.
131. Стадник І.Я. Міжнародна науково-технічна конференція "Теоретические и прикладные проблемы математики, механики и информатики" Карагандинский государственный университет им. Е. А. Букетова. 2010. С. 103.
132. Стадник І.Я. Напрямки і перспективи в додержанні раціональності процесу замішування. Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні технології і обладнання харчових виробництв» ТНТУ імені Івана Пулюя. 2011. С. 252 – 253.
133. Стадник І.Я. Використання спектрального аналізу ділянок полімерного борошна при дослідженні параметрів поверхневих шарів утворюючого тіста [Текст] / І.Я. Стадник, І. Добротвор // Хранение и переработка зерна.2014. № 8. С. 49 – 51.
134. Стадник І.Я. Визначення динамічного процесу першої стадії тістоутворення методом термодинамічних потенціалів. [Текст] / І.Я. Стадник, І.Г. Добротвор, О.С. Покотило, М. Коневич // Хранение и переработка зерна.2014. № 10. С. 50 – 53.
135. Тульский, Н.В. Действие давления на процесс брожения теста [Текст] / Тульский Н.В., Чернышев Н.Н. // Хлебопекарная и кондитерская промышленность. – 1972. – № 5. – С. 7 – 8.
136. Уилкинсон, У.Л. Неньютоновские жидкости: Пер. с англ [Текст] / Уилкинсон У.Л. – М.: Мир, 1964. – 216 с.
137. Урьев, Н.Б. Пищевые дисперсные системы [Текст] / Урьев Н.Б., Талейсник М.А. – М.: Агропромиздат, 1985. – 296 с.

138. Урьев, Н.Б. Физико-химическая механика и интенсификация образования пищевых масс [Текст] / Урьев Н.Б., Талейсник М.А. – М.: Пищевая промышленность, 1976. – 240 с.
139. Урьев, Н.Б. Физико-химические основы технологии дисперсных систем и материалов [Текст] / Урьев Н.Б. – М.: Химия, 1988. – 256 с.
140. Федоткин, И.М. Математическое моделирование. Теория технологических процессов и их интенсификации [Текст] / Федоткин И.М., Гулый И.С. – К.: – Арктур – А, 1998. – 416 с.
141. Хелми, Б. Изменение реологических характеристик теста в процессе изготовления хлебных изделий [Текст]: дис. канд. техн. наук: 05.18.12 / Хелми Б. – М., 1985. – 240 с.
142. Черняк О.В. Основи теплотехніки і гідравліки [Текст]: Черняк О.В. Рибчинська Г.Б. / К.: “Вища школа”, 1982. – 221 с.
143. Чижова, К.Н. Технохимический контроль хлебопекарного производства [Текст] / Чижова К.Н., Шкваркина Т.И., Запенина Н.В. и др. – М.: Пищевая промышленность, 1975. – 480 с.
144. Черных, В.Я. Некоторые теоретические вопросы замеса теста [Текст] / Черных В.Я., Пучкова Л.И., Ляковский Ю.Л., Салапин Н.Б. // Хлебопекарная и кондитерская промышленность. – 1987. – № 4. – С. 33 – 35.
145. Чувахин, С.В. Структурно-механические свойства помадных масс с добавками [Текст] / Чувахин С.В., Лавицки Т., Эйнгор М.Б., Голденко Г. Б., Карпин Б.А. // Хлебопекарная и кондитерская промышленность. – 1979. – № 9. – С. 37 – 39.
146. Штефан, Є.В. Моделювання поведінки дисперсних систем у нерівноважних процесах харчових виробництв [Текст] / Штефан Є.В. // Наукові праці УДУХТ. – 2000. – № 8. – С. 63 – 66.
147. Юрчак, В.Г. Действие интенсивного замеса теста на его водопоглотительную способность [Текст] / Юрчак В.Г., Скорикова А.И.,

- Ройтер И.М. // Хлебопекарная и кондитерская промышленность. – 1975. – № 10. – С. 14 – 16.
148. Abecassis, J. Influence of extrusion conditions on extrusion speed, temperature, and pressure in the extruder and on pasta quality [Текст] / Abecassis J., Abbou R., Chaurand M. // Cereal chemistry. – 1994. – № 3. – P.247 – 253.
149. Antila, J. Production of flat bread by extrusion cooking using different wheat/rye ratios, protein enrichment and grain with poor baking ability [Текст] / Antila J., Seiler K., Seibel W. and Linco P. // Journal Food Engineering. – 1983. – № 2. – С. 189 – 210.
150. Bhattacharya, S. Extrusion of blends of rice and chick pea flours: a response surface analysis [Текст] / Bhattacharya S., Prakash M. // Journal of Food Engineering. – 1994. – vol.21. – P. 315 – 330.
151. Bhattacharya, S. Influence of process and product variables on extrusion energy and pressure requirements [Текст] / Bhattacharya S. and Hanna M.A. // Journal of Food Engineering. – 1987. – № 6. – P. 153 – 163.
152. Binoy, K. Gogoi Relationships between residence time and process variables in a corotating twin-screw extruder [Текст] / Binoy, K. Gogoi and Kit L. Yam // Journal of Food Engineering. – 1994. – vol.21. – P. 177 – 196.
153. Dubois, D. What is fermentation? [Текст] / Dubois D. // Bakers Digest. – 1984. – № 1. – P. 11 – 14.
154. Fan, J. A computer simulation of the dynamics of bubble growth and shrinkage during extrudate expansion [Текст] / Fan J., Mitchell J.R., Blanshard J.M.V. // Journal of Food Engineering. – 1994. – vol.23. – P. 337 – 356.
155. Guy, R. C. The extrusion revolution [Текст] / Guy R.C. // Food Manufacture. – 1985. – № 60. – P. 26 – 29.
156. Hsieh, F. Twin-screw extrusion of rice flour with salt and sugar [Текст] / Hsieh F., Grenus K. M., Hu L. // Cereal chemistry. – 1993. – vol.70, № 5. – P. 493–498.

157. Jin, Z. Extrusion cooking of corn meal with soy fiber, salt and sugar [Текст] / Jin Z., Hsieh F., Huff H. E. // Cereal chemistry. – 1994. – vol.71, № 3. – P. 227 – 234.
158. Lue, S. Modeling of twin-screw extrusion cooking of corn meal and sugar beet fiber mixtures [Текст] / Lue S., Hsieh F., Huff H.E. // Journal of Food Engineering. – 1994. – vol.21. – P. 263 – 289.
159. Maldari, D. Design and performance of pasta dies [Текст] / Maldari D., Maldari C. // Cereal foods world. – 1993. – vol.38, № 11. – P. 807 – 810.
160. Pyler, E. J. Systems of accelerated dough development [Текст] / Pyler E. J. // Bakers Digest. – 1982. – № 8. – P. 22 – 26.
161. Rakesh, K. Singh. Research Directions for Food Engineering [Текст] / Rakesh K. Singh. // Journal of Food Engineering. – 1994. – vol.23. – P. 491 – 499.
162. Rao, M.A. Anantheswaran Rheology of fluids in food processing [Текст] / Rao M.A. and R.C. // Food Technology. – 1982. – № 2. – P. 116 – 126.
163. Rizvi, S.S. H. Research needs in food engineering, processing and packaging [Текст] / Rizvi S.S. H., Singh R.K., Hotchkiss J.H., Heldman D.R. & Leung H.K. // Food Technology. – 1993. – № 47. – C. 26 – 35.
164. Sanches, H.D. Whey protein concentrates in baking [Текст] / Sanches H.D., Osella C.A., Mancuello J.C., Fabre H. C. // Bakers Digest. – 1984. – № 5. – C. 18 – 20.
165. Sunderland, R. Continuous breading production by extrusion cooking [Текст] / Sunderland R. // Cereal foods world. – 1993. – vol.38, № 9. – P. 685 – 688.
166. Valle, Della Relationship of extrusion variables with pressure and temperature during twin screw extrusion cooking of starch [Текст] / Della Valle, G., Tayeb, J. and Melcion, J.P. // Journal of Food Engineering. – 1987. – № 6. – P. 423 – 444.

167. Пат. 4159878 США, МКИ А 21С 1/00. Device for forming sticks, blocks and other formed parts from dough material [Текст] / Willem H. Willemsen. – № 879911; Заявл. 22.02.77; Опубл. 09.08.77 [Текст] / НКИ 366 – 69. – 1 с.
168. Пат. 5609903 А США, МКИ А 21 С 3/04. Способ экструзионного формования многожгутового продукта [Текст] / Gary E; Кнапп, John, Foley, Mark; Pepperidge farm, incorporated – № 476399; Заявл. 07.06.95; Опубл. 11.03.97. НКИ 426 – 500 – 1 с.
169. Пат. 721737А2 Германия, МКИ А 21 С 5/04. Тестоделительная и тесторазделочная машина [Текст] / Kock, Gerd; Werner and Pfeleiderer. – № 95116468.0; Заявл. 19.10.95; Опубл. 17.07.96. – 1 с.

А. Додаток до розділу 3

Додаток А1

Визначення секундного розходу маси тіста

$h_1 := 0.02$	$R := 0.1$
$h_2 := 0.025$	$\mu := 1.7 \cdot 10^3$
$h_3 := 0.03$	$\omega := 10.47$

$I_{01}(\varphi) := \int_0^\varphi \frac{(h_1)^0}{(R + h_1) \cdot \left[\ln \left(1 + \frac{h_1}{R} \right) - \frac{h_1}{2} \cdot \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R + h_1} \right) \right]} d\varphi$	$I_{11}(\varphi) := \int_0^\varphi \frac{(h_1)^1}{(R + h_1) \cdot \left[\ln \left(1 + \frac{h_1}{R} \right) - \frac{h_1}{2} \cdot \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R + h_1} \right) \right]} d\varphi$
$I_{02}(\varphi) := \int_0^\varphi \frac{(h_2)^0}{(R + h_2) \cdot \left[\ln \left(1 + \frac{h_2}{R} \right) - \frac{h_2}{2} \cdot \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R + h_2} \right) \right]} d\varphi$	$I_{12}(\varphi) := \int_0^\varphi \frac{(h_2)^1}{(R + h_2) \cdot \left[\ln \left(1 + \frac{h_2}{R} \right) - \frac{h_2}{2} \cdot \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R + h_2} \right) \right]} d\varphi$
$I_{03}(\varphi) := \int_0^\varphi \frac{(h_3)^0}{(R + h_3) \cdot \left[\ln \left(1 + \frac{h_3}{R} \right) - \frac{h_3}{2} \cdot \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R + h_3} \right) \right]} d\varphi$	$I_{13}(\varphi) := \int_0^\varphi \frac{(h_3)^1}{(R + h_3) \cdot \left[\ln \left(1 + \frac{h_3}{R} \right) - \frac{h_3}{2} \cdot \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R + h_3} \right) \right]} d\varphi$

$$Q_1 := \frac{\omega \cdot R}{2} \cdot \frac{I_{11}(2 \cdot \pi)}{I_{01}(2 \cdot \pi)} = 0.01047$$

$$Q_2 := \frac{\omega \cdot R}{2} \cdot \frac{I_{12}(2 \cdot \pi)}{I_{02}(2 \cdot \pi)} = 0.01309$$

$$Q_3 := \frac{\omega \cdot R}{2} \cdot \frac{I_{13}(2 \cdot \pi)}{I_{03}(2 \cdot \pi)} = 0.01571$$

Додаток А2

Графічний метод визначення секундного розходу маси тіста

ORIGIN := 1
 ~~~~~

$R_i :=$   
 ~~~~~

$i := 1..3$

$n := 1.66666'$

0.12
0.125
0.13

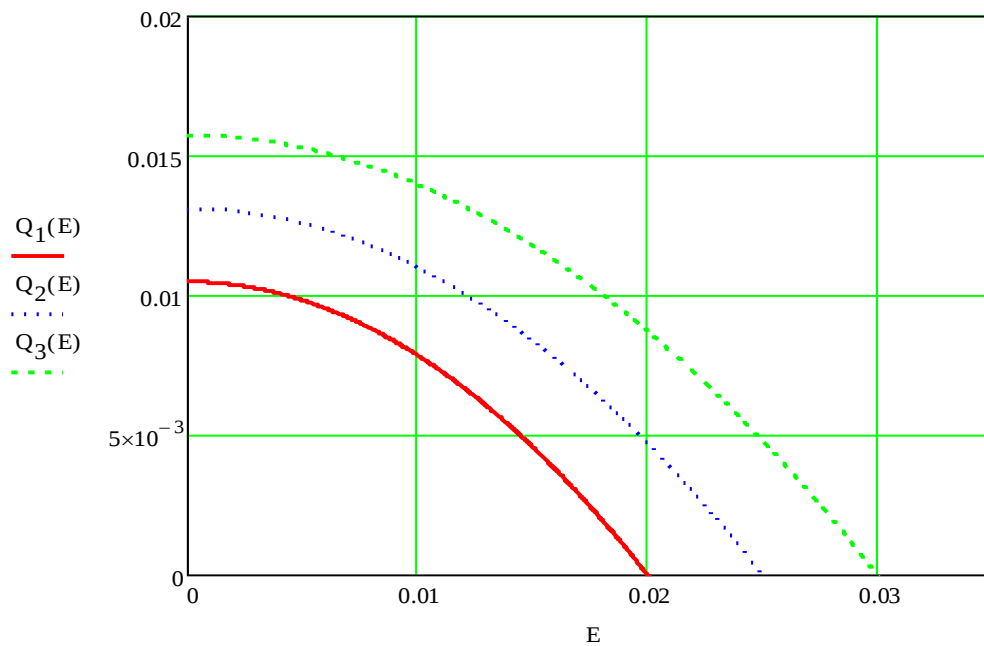
$$Q_1(E) := \frac{\omega \cdot r}{2} \cdot \left(R_1 - r - \frac{E^2}{R_1 - r} \right)$$

$$Q_2(E) := \frac{\omega \cdot r}{2} \cdot \left(R_2 - r - \frac{E^2}{R_2 - r} \right)$$

$$Q_3(E) := \frac{\omega \cdot r}{2} \cdot \left(R_3 - r - \frac{E^2}{R_3 - r} \right)$$

$\omega := 2 \cdot \pi \cdot n = 10.472$

$r := 0.1$



$Q_1(0) = 0.01047$

$Q_2(0) = 0.01309$

$Q_3(0) = 0.01571$

Додаток АЗ

Графік залежності напруження тертя від зміни зазору

ORIGIN := 1

i := 1..3

$Q_i :=$

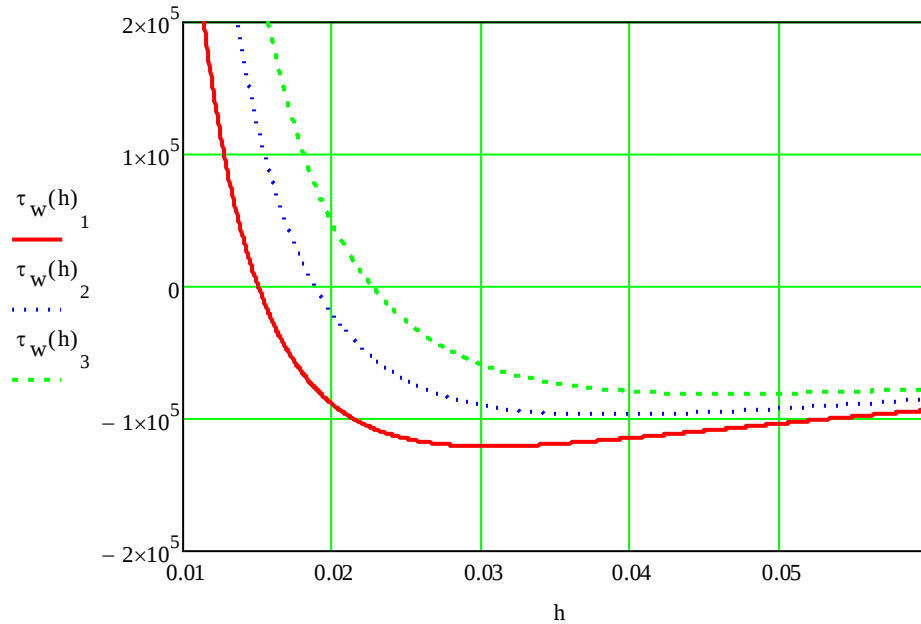
0.01047
0.01309
0.01571

$\mu := 1.7 \cdot 10^3$

$\omega := \pi \cdot \frac{100}{30} = 10.472$

$R := 0.1$

$$\tau_w(h) := \frac{2 \cdot \mu}{R \cdot h} \cdot \left(\frac{\omega \cdot R \cdot h}{2} - Q \right) \cdot \frac{\ln \left(1 + \frac{h}{R} \right) - \frac{h}{R + h}}{\ln \left(1 + \frac{h}{R} \right) - \frac{h}{R + h} \cdot \left(1 + \frac{h}{2 \cdot R} \right)} - \frac{\omega \cdot R \cdot \mu}{h}$$



Графік залежності зміни поверхні пластикатора від кута фі

ORIGIN := 1

i := 1..3

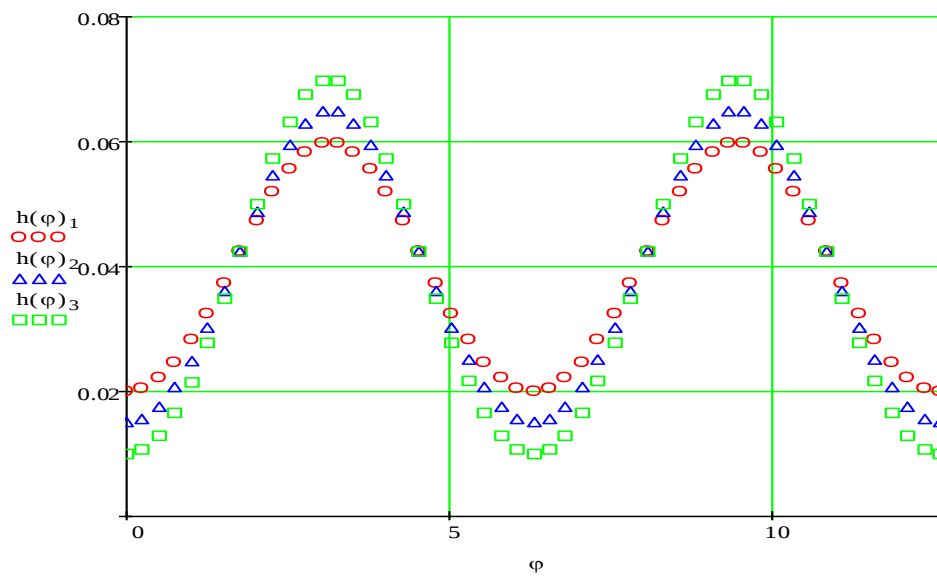
R₁ := 0.1

E_i :=

0.02
0.025
0.03

r := 0.1

$$h(\varphi) := \sqrt{R_1^2 - (E)^2 \sin(\varphi) \cdot \sin(\varphi) - (r + E \cdot \cos(\varphi))}$$



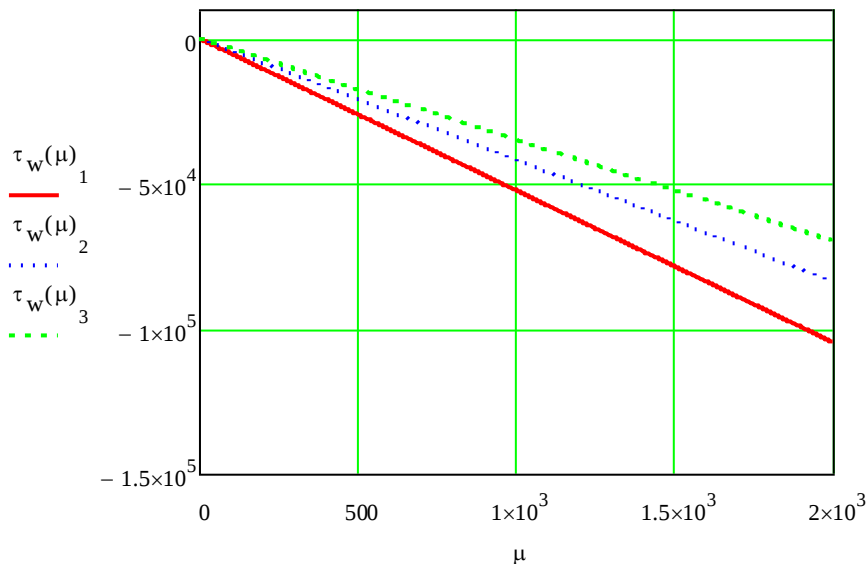
Г1. Обчислення зміни концентрації ідеального змішування в об'ємі робочої камери

$$\frac{dS}{dt} = \frac{v}{V}(S' - S)$$

$$-\frac{d(S' - S)}{dt} = \frac{v}{V}(S' - S)$$

де S та S' – поточна та рівноважна концентрації суміші компонентів у робочій камері, t – час, v – об'ємна швидкість потоку, V – об'єм робочої камери.

Ліва частина рівняння відображає зміну об'ємної концентрації в псевдо камері за період дозування компонентів. Друга частина відображає зміну концентрації, фіксованої в просторі (об'ємі), і швидкості при перемішуванні в стаціонарному полі. Схема структури потоків у зважувальному змішуванні (рис. 4.6).



$$-\frac{d(S' - S)}{dt} = \frac{v}{V}(S' - S);$$

$$-\frac{dy}{dt} = w \cdot y; \quad -\int \frac{dy}{y} = \int w \cdot dt;$$

$$-\ln|y| = w \cdot t + C;$$

$$\ln|y| = C - w \cdot t;$$

$$y = e^{C-w \cdot t}, \quad S' - S = C_0 \cdot e^{-\frac{\nu}{V} t};$$

$$\text{при } t \rightarrow \infty, S \rightarrow S';$$

$$\text{при } t = 0, S = 0, S' = C_0 \cdot 1;$$

$$S(t) = S' - S' \cdot e^{-\frac{\nu}{V} t}, \quad S(t) = S'(1 - e^{-\frac{\nu}{V} t}).$$

Початкові умови швидкості надходження рідких компонентів (ur) та борошна (ut) до місильної камери, кг/сек:

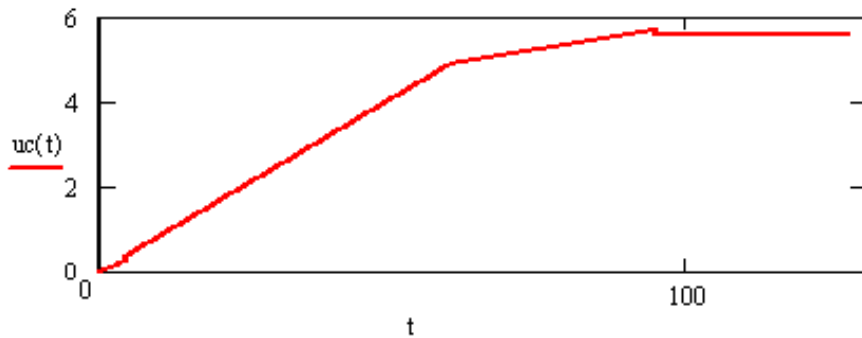
$$ur := \frac{2.05}{90} \quad ur = 0.023 \quad ut := \frac{3.55}{60} \quad ut = 0.059 \quad t := 0, 0.1 \dots 240$$

Побудова графічної залежності швидкості зміни маси в камері при заданих параметрах:

$$urc(t) := \begin{cases} ur \cdot t & \text{if } 5 \leq t \leq 95 \\ 0 & \text{if } 0 \leq t < 5 \\ 2.05 & \text{otherwise} \end{cases} \quad utc(t) := \begin{cases} ut \cdot t & \text{if } 0 \leq t < 60 \\ 3.55 & \text{otherwise} \end{cases} \quad uc(t) := urc(t) + utc(t)$$

Зміна граничної концентрації.

$$v(t) := \frac{d}{dt} uc(t) \quad vv := 10 \quad ss := \frac{ut}{ur + ut} \quad ss = 0.722$$



Зміна граничної концентрації за період дозування компонентів

Для нотаток

[illegible]

Для нотаток

[illegible]

Для нотаток

This image shows a single sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

Для нотаток

This image shows a full page of blank handwriting practice paper. It features approximately 28 horizontal blue lines spaced evenly down the page. There are no margins, text, or other markings present.

Для нотаток

[illegible]

Для нотаток

[illegible]



Видавництво Тернопільського національного технічного університету ім. І. Пулюя

виготовляє підручники для вузів, методичну літературу, художні видання, надає редакційно-видавничі та поліграфічні послуги з набору тексту, розробки макетів і друку книги чи будь-якої іншої поліграфічної продукції (брошури, плакати, афіші, календарі).

КРІМ ТОГО, ВИДАВНИЦТВО ПРОПОНУЄ ТАКІ ПОСЛУГИ:

- дизайн візитівок, буклетів, вітальних листів;
- професійне вичитування і верстку;
- сканування та копіювання;
- чорно-білий і повноколірний друк.



м. Тернопіль,
вул. Гоголя, 8.
Тел.: 43-02-09.

e-mail.: vydavnytstvo@tu.edu.te.ua

Наукове видання

Стадник І.Я.

Науково-технічні основи дискретної дії на компоненти при перемішуванні

МОНОГРАФІЯ

Редактор *Є.І. Гриценко*
Комп'ютерне верстання *О.А. Дзядик*

Формат 60х90/16. Обл. вид. арк. 8,24 Тираж 300 пр. Зам. № 2579.

Видавництво Тернопільського національного
технічного університету імені Івана Пулюя.
46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4226 від 08.12.11.