

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

ІПАК МАКСИМ СЕРГІЙОВИЧ

УДК 664.653.122(043.3)

**МОДЕЛЮВАННЯ ЗАМІШУВАННЯ ТІСТА ТА ВИЗНАЧЕННЯ
РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧИХ ОРГАНІВ
ТІСТОМІСИЛЬНИХ МАШИН**

05.18.12 - процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та
фармацевтичних виробництв

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Київ - 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті харчових технологій
Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Литовченко Ігор Миколайович
Національний університет харчових технологій,
МОН України,
доцент кафедри машин і апаратів харчових
та фармацевтичних виробництв

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Сіадник Ігор Ярославович
Тернопільський національний технічний університет ім.
Івана Пулюя, МОН України,
професор кафедри обладнання харчових технологій

доктор технічних наук, професор
Мікульонюк Ігор Олегович
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут", МОН України,
професор кафедри хімічного, полімерного та
силікатного машинобудування

Захист відбудеться " " 2015 року о годині на засіданні
спеціалізованої вченої ради Д 26.058.02 Національного університету харчових
технологій за адресою: 01601, м. Київ, вул. Володимирська, 68, аудиторія А-311.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету
харчових технологій за адресою: 01601, м. Київ, вул. Володимирська, 68.

Автореферат розісланий " " 2015 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
к.т.н, доц.

Л. О. Кривопляс-Володіна

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Традиційно ведучим обладнанням лінії виробництва хлібобулочної продукції вважають піч. Саме вона, насамперед, визначає продуктивність лінії та витрати енергоносіїв. Але не варто недооцінювати роль іншої стадії виробництва - замішування тістових напівфабрикатів і тіста. Від неї залежить рівномірність розподілу компонентів, майбутня структура виробів, здатність утримувати ними форму та інші якісні показники. Процес замішування також впливає на економічні показники роботи підприємства, оскільки енергетичні витрати при перемішуванні високов'язких рідин, до яких належить тісто, досить великі.

Якість реалізації процесу замішування оцінюють за показником його ефективності. Ефективність замішування насамперед залежить від режиму руху середовища, тому багато наукових праць спрямовані на визначення умов, які викликають або підсилюють турбулентність течії. Досягти цього можна як зміною конструкції обладнання, так і коригуванням режимів замішування, однак і те, й інше потребує ґрунтовних досліджень. Сучасні виробники прагнуть підвищувати якість своєї продукції та знижувати її собівартість. Таким чином, підвищення ефективності замішування пшеничного тіста як з технологічної, так і з економічної точок зору є актуальним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до пріоритетного напрямку наукових робіт НУХТ, зокрема до теми: «Розроблення наукових основ тепломасообмінних та інших процесів харчових, мікробіологічних і фармацевтичних виробництв з метою створення нових високоефективних технологій та обладнання, засобів механізації та автоматизації для харчових та переробних галузей АПК» (схвалено вченою радою НУХТ, протокол № 7 від 25.03.2006) та пов'язана з кафедральною темою на 2010-2015 р.р.: «Інтенсифікація технологічних процесів з метою створення високоефективного обладнання харчових, мікробіологічних і фармацевтичних виробництв» науково-дослідної роботи Національного університету харчових технологій (схвалено на засіданні кафедри МАХВ, протокол № 3 від 17 вересня 2010 р.). Виконана робота відповідає Закону України від 12 жовтня 2010 р. № 2623-ІІ «Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки».

Мета і задачі досліджень. Метою досліджень є розробка ефективної конструкції обладнання для замішування, наукове обґрунтування режимів реалізації в ньому стадій первинного змішування компонентів і пластифікації, геометричних параметрів перемішуючого пристрою.

У відповідності з поставленою метою були сформульовані такі задачі:

- встановити залежність, яка характеризує взаємозв'язок в'язкості і швидкості деформації при замішуванні пшеничного дріжджового тіста;
- визначити залежність індексу течії від швидкості деформації пшеничного дріжджового тіста;

- створити адекватні моделі стадій первинного змішування компонентів та власне замісу у програмному комплексі Flow Vision;
- проаналізувати зміну концентрації компонентів тіста і його швидкість в робочому об'ємі тістомісильної машини під час першої стадії змішування - механічного змішування компонентів; визначити необхідну тривалість цього етапу;
- обґрунтувати вид перемішуючого пристрою, який найбільш доцільно використовувати для замішування, оптимізувати його форму і режими роботи;
- запропонувати методику визначення проектної потужності приводу тістомісильних машин;
- створити математичну модель, яка пов'язує енергетичні витрати на замішування тіста з параметрами, шр на нього впливають. Визначити раціональні режими реалізації процесу;
- розробити конструкцію тістомісильної машини, яка забезпечує якісне замішування пшеничного дріжджового тіста при знижених енергетичних витратах.

Об'єкт і предмет досліджень. *Об'єктом дослідження* виступає процес замішування пшеничного дріжджового тіста. *Предметом досліджень* є структурно-механічні властивості тіста, режими замішування, конструктивні параметри місильних органів і енергетичні витрати на замішування.

Методи дослідження. Дослідження виконані *методами* математичного і фізичного моделювання. Процес замішування тіста промодельовано у програмному пакеті для персональних комп'ютерів FlowVision російської фірми "Тесис" (ліцензія №20110 від 26.07.07р.). Враховано властивості тіста як псевдопластичної рідини. Задача оптимізації геометрії перемішуючого пристрою вирішена з використанням теорії ПФЕ та аналітичних методів пошуку екстремуму функції. Для планування фізичних експериментів застосували метод Зейделя-Гаусса, підсумком використання якого є багатфакторна кореляційна залежність на основі отриманої функції Протодияконова

Для обґрунтування раціональних режимів замішування тіста вирішена задача по визначенню компромісних значень керуючих параметрів в пакеті MathCad.

Характеристики рецептурних компонентів, тістового напівфабрикату та готової продукції визначені за стандартними методиками, які використовуються в хлібопекарській галузі.

Наукова новизна одержаних результатів:

- визначено залежність індексу течії від швидкості деформації пшеничного дріжджового тіста;
- створені адекватні математичні моделі стадій первинного змішування компонентів і пластифікації;
- визначено силу опору і розподіл її складових при замішуванні тіста;
- вирішена задача оптимізації геометричних параметрів штифтового перемішуючого пристрою;

- отримана математична модель процесу замішування тіста, яка встановлює взаємозв'язок між витратами енергії і факторами, що на них впливають;

- отримано експериментальні залежності, які встановлюють взаємозв'язок режимів замішування із якісними показниками тістових напівфабрикатів.

Практичне значення одержаних результатів:

- визначені відстані між кромками різних типів робочих органів і поверхнями обладнання, які слід забезпечувати для отримання якісних тістових напівфабрикатів;

- запропонована методика визначення потужності приводу тістомісильних машин з використанням програмного комплексу Flow Vision;

- надано рекомендації щодо підвищення ефективності замішування тіста завдяки використанню штифтових робочих органів та за рахунок реалізації цього процесу при раціональних рекомендованих режимах (визначена необхідна вологість тістових напівфабрикатів, частота обертання перемішуючого пристрою і тривалість процесу);

- розроблена конструкція тістомісильної машини, використання якої створює сприятливі умови для турбулізації потоку при обтіканні тістовими напівфабрикатами місильних органів.

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні положення, що стосуються комп'ютерного моделювання процесу замішування пшеничного дріжджового тіста, а також методика проведення фізичних експериментів розроблені у співавторстві з науковим керівником кт.н., доц. Литовченком І.М. Автором особисто: запропонована ідея, розроблені геометричні моделі ємкості і перемішуючих пристроїв, обрані умови однозначності; виконані обчислювальні експерименти; проведені дослідження на фізичній моделі, виконано обробку і аналіз їх результатів.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на 72-76-й і 80-й конференціях молодих учених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді - вирішенню проблем харчування людства у ХХІ столітті», Київ, НУХТ 2005-2014 роки; IX-й Міжнародній науково-технічній конференції 'Нові технології та технічні рішення в харчовій та переробній промисловості: сьогодення і перспективи, Київ, 2005 рік; I-й Міжнародній науково-практичній конференції "Науково-технічна творчість студентів з процесів і обладнання харчових виробництв", Донецьк, 2009 рік; VII-й Міжнародній науковій конференції студентів і аспірантів «Техника и технология пищевых производств», Республіка Беларусь, Могильов, 2010 рік; міжнародній науково-практичній конференції «Инженерные системы», Російська Федерація, Москва, 2011 рік; VIII-й Міжнародній науково-технічній конференції «Техника и технология пищевых производств», Республіка Беларусь, Могильов, 2011 рік; Міжнародній науково-практичній конференції «Инновационные технологии в производстве и переработке сельскохозяйственной продукции», Республіка Беларусь, Мінськ,

2011 рік; регіональній науково-практичній конференції "Молодежь и научно-технический прогресс", Російська Федерація, Владивосток, 2011 рік; 11-й міжнародній конференції "Research and Development in Mechanical Industry", Сербія, Сокобаня, 2011 рік; XV-й Міжнародній студентській науковій конференції «Технология хранения и переработки сельскохозяйственной продукции», Республіка Беларусь, Гродно, 2014 рік.

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 26 друкованих праць, з яких 1 стаття у закордонному виданні, 5 статей у наукових журналах і збірниках наукових праць і 16 тез доповідей наукових конференцій; отримано 4 патенти України на винахід і корисні моделі.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел зі 135 найменувань та 8 додатків, що наведені на 192 сторінках машинописного тексту, включаючи 18 таблиць та 42 рисунки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульована мета та основні завдання досліджень, наукова новизна та практична цінність отриманих результатів, проаналізовано основні тенденції розвитку хлібопекарської галузі.

У першому розділі розглянуті структурно-механічні характеристики неньютонівських рідин і обґрунтована належність до них тіста, наведено теоретичні основи процесу замішування, проаналізовано вплив в'язкості матеріалу на гідродинаміку замішування.

Обґрунтована необхідність моделювання процесу замішування тістових напівфабрикатів, а також доцільність використання теорії подібності для опису процесу.

Проаналізовані конструкції обладнання для замішування тістових напівфабрикатів, що дало змогу сформулювати основні тенденції розвитку машин означеного класу, особливості їх конструктивного виконання.

У другому розділі наведено положення, що стосуються фізичного і математичного моделювання процесу перемішування компонентів тіста та його замісу.

В розділі представлено математичні залежності, які описують процес замішування, та умови однозначності, що забезпечують отримання адекватних результатів. Обґрунтовано вибір змінних моделі.

Загальноприйнятої термінології процесу приготування хлібного тіста немає. В даній роботі прийнята термінологія, якої дотримується більшість науковців:

- перемішування - етап з'єднання борошна та рідких компонентів до утворення суміші;
- заміс (пластифікація) - етап механічної обробки суміші з метою набуття бажаних реологічних властивостей;

замішування - процес приготування тіста, який об'єднує два попередні етапи.

Проаналізувавши відому залежність витрат потужності від тривалості замішування, виділено межі окремих стадій процесу, зокрема первинного змішування і пластифікації, які при математичному моделюванні розглянуті як окремі задачі. Обидві вони розв'язувалися методом скінчених об'ємів у ліцензованому програмному пакеті Ном^Уїаоп.

При математичному моделюванні введено ряд припущень (рис. 1).

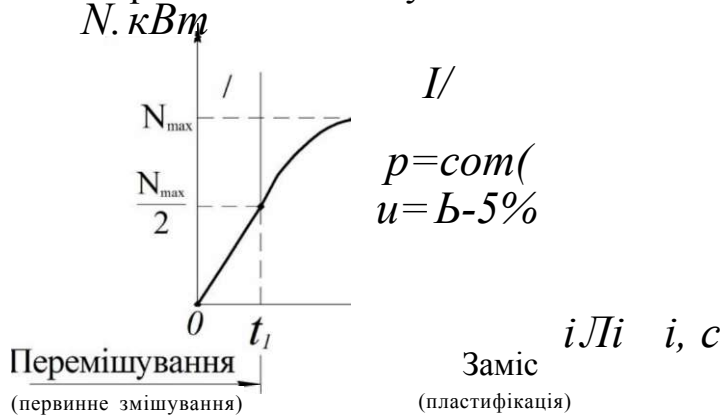


Рис. 1. Соматичне зображення основних припущень при моделюванні

На етапі первинного змішування розглядаємо зміну рівномірності розподілу двох компонентів - борошна та рідини. Кінцевим часом цього етапу при проведенні фізичного експерименту вважаємо час, при якому крива зміни потужності замісу досягає значення $N_{\max}/2$.

На етапі пластифікації густину неньютонівської рідини вважаємо сталою. Час

завершення процесу $\hat{t}$ визначаємо за умови:

$$\hat{t}_k = \hat{t}_2 - 5\%, \quad (1)$$

де $\hat{t}$ - кінцевий час процесу, при досягненні якого структура тіста починає руйнуватися, що призводить до зниження енерговитрат.

Планування фізичних експериментів щодо визначення витрат енергії та якості тістових напівфабрикатів здійснено з використанням методу Зейделя-Гаусса, обробка отриманих результатів - на основі функції Протодіяконова

Для дослідження процесу замішування пшеничного тіста створено експериментальну установку (рис. 2). Рецептурні компоненти дозуються в місильну ємкість 2, закріплену на столику 1. Вимикачем 16 приводиться в дію мотор-редуктор 20, від якого через клинопасову передачу 19 здійснюється обертання місильної ємкості з частотою 6 об/хв.

Через електродвигун 12 та клинопасову передачу 8 приводяться в рух місильні органи 3, жорстко закріплені на валу 6. Для усунення впливу ефекту Вайсенберга (руху тіста вгору по валу), на валу 6 закріплено відбивний диск 4, з якого тісто скребком 5 спрямовується назад у місильну ємкість. За допомогою обгінної муфти 9 через регулятор швидкості 10 змінюється частота обертання місильних органів 3, значення якої вимірюється тахометром 11. Для запобігання травматизму клинопасову передачу 8 захищено кожухом 7.

Температура тіста визначається мультиметром 17 з допомогою термопари 18, а потужність, що витрачається на заміс, фіксується ватметром 13.

Основні вузли тістомісильної машини змонтовані на станині 15, яка має опори 14.

Розрахована потужність N , яка споживається в процесі замішування, Вт:

$$N = \omega \cdot M_{кр} = \omega \cdot P_{оп} \cdot l, \quad (5)$$

де ω - кутова швидкість місильних органів, c^{m1} ;

$P_{оп}$ - сила опору, Н;

l - плече дії сили, м

У третьому розділі представлені результати математичного моделювання процесу замішування тіста на стадіях первинного змішування компонентів і власне замісу. Завдяки появі потужного програмного забезпечення, призначеного для розв'язання задач гідродинаміки, з'явилася можливість проаналізувати і візуалізувати процеси, що відбуваються під час замісу тіста. При коректній постановці задачі використання таких обчислювальних комплексів дає можливість скоротити тривалість досліджень і зменшити їх вартість, отримуючи адекватні результати.

Важливою класифікаційною ознакою тістомісильних машин є форма робочих органів. Серед їх великого різноманіття чітко виділяються 4 основні види, які використовуються для замісу тіста середньої вологості: лопатеві (типовими представниками є машини И8-ХТА, Х12, «Стандарт»), спіральні (Л4-ХТВ, ріоята, Восток), рамні (А2-ХТЗБ) та штифтові (ІМК-150) (рис. 3). Конструкції перемішуючих пристроїв інших машин для замісу тіста можуть або бути зведені до перерахованих вище (так, шнек розглядаємо як спіраль, навиту на вал, 2-подібні органи машини ТМ-63 - як виток спіралі тощо) або є їх комбінацією.

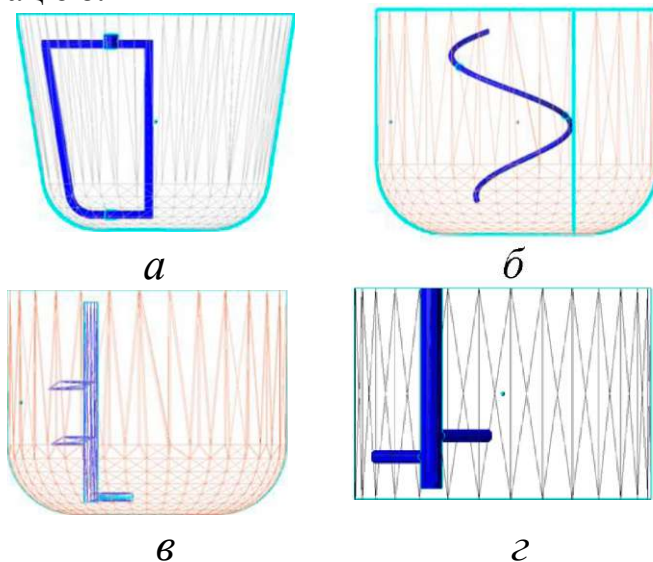


Рис. 3. 3D моделі для математичного моделювання процесу замішування з робочими органами:

а - рамним;

б - спіральним;

в - лопатевим та

г -

Тому доцільно проаналізувати вплив на процес замішування тіста саме лопатевих, рамних, спіральних і штифтових робочих органів.

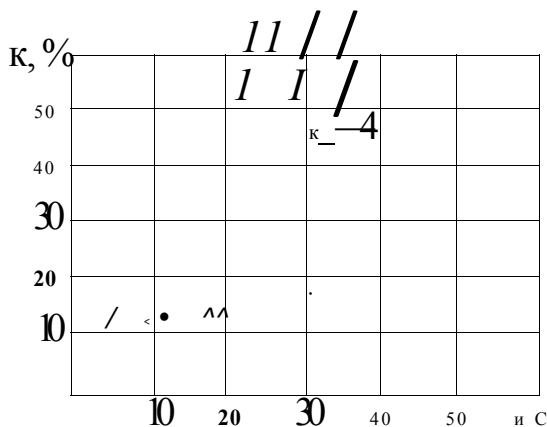
Хлібне тісто належить до псевдопластичних неньютонівських рідин, тому для розробки адекватної математичної моделі, яка б з достатньою точністю описувала процес його замішування, слід врахувати ряд факторів та властивостей, які є визначальними. При вирішенні поставленої задачі виконана математична обробка інформації, отриманої під час роботи над першим розділом дисертації, а також здійснене фізичне та математичне моделювання процесу, що досліджується. Встановлені функціональні залежності між

в'язкістю $\tau]$ та швидкістю деформації $\dot{\gamma}$, зокрема $\tau_{\dot{\gamma}=0,45}$. За методикою, запропонованою Метццером-Ридом, визначений індекс течії n , який залежить від швидкості деформації: $n =$

Оскільки первинне змішування компонентів (перемішування) і пластифікація тіста (заміс) потребують різної постановки задачі, завдання інших умов однозначності, ці дві стадії процесу замішування розглянуто окремо. Кожна з них промодельована для чотирьох основних видів робочих органів з метою вибору найбільш раціональної конструкції форми перемішувального пристрою.

Основними показниками при аналізі процесу замішування в'язких мас є інтенсивність та ефективність процесу.

В якості критерію ефективності робочого органу, який визначає якість процесу, обрано зміну концентрації суміші K на початковій стадії замішування протягом 60 с (рис. 4).



Аналіз процесів свідчить, що три із чотирьох розглянутих форм робочих органів - спіральний, лопатевий і штифтовий - забезпечують отримання рівномірної суміші при науково обґрунтованій тривалості цієї стадії.

Інтенсивність замішування визначається кількістю енергії, яка вводиться в одиницю об'єму матеріалу, що замішується, за одиницю часу.

При моделюванні етапу замісу основна увага приділена виникненню циркуляційних вихорів в області проходження робочого органу. Їх формування залежить від в'язкості суміші геометрії місильних органів та швидкості руху продукту в ємкості.

Рис. 4. Зміна рівномірності розподілу компонентів тіста в місильній ємкості від тривалості стадії перемішування для робочих органів різної форми: 1 - рамний; 2 - спіральний; 3 - штифтовий і 4 - лопатевий.

З теорії відомо, що тісто належить до псевдопластичних неньютонівських рідин, в'язкість яких зменшується зі збільшенням градієнта швидкості деформації. В дисертаційній роботі вперше отримано розподіл значень в'язкості тіста в місильній ємкості у графічному і числовому вигляді. В областях, де в'язкість найменша, найбільш ефективно відбувається замішування.

Мінімальні значення в'язкості (20...30 Па·с) спостерігаються безпосередньо поблизу місильних органів, в інших частинах об'єму в'язкість тіста значно більша (досягає 200 Па·с та вище). Ця інформація дає змогу визначити активну зону замішування - зону, в якій створюються сприятливі умови для виникнення циркуляційних вихорів. Її розмір дуже важливий, так як розташування місильних лопатей від стінок ємкості на відстанях, що

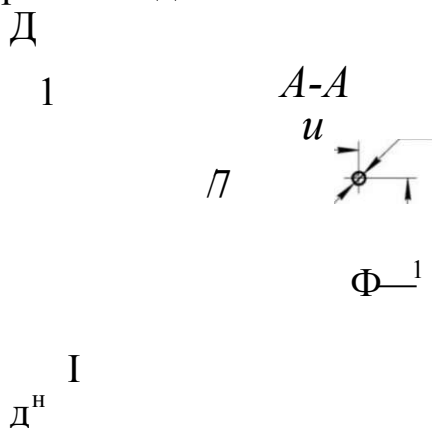
перевищують розмір тці зони призведе до утворення застійних зон та погіршення якості тістових напівфабрикатів.

Аналізуючи результати моделювання процесу обтікання тістом робочих органів із різними профілями поперечного перерізу визначено, що найбільша область турбулізації продукту спостерігається при використанні робочих органів круглого перерізу.

Незважаючи на отримання достатньо рівномірної суміші протягом найменшого часу від початку процесу (див. рис. 4), лопатеві змішувачі рідко використовуються в конструкціях промислових тістомісильних машин періодичної дії внаслідок створення ними несприятливих умов для обтікання тіста. Занадто велика частота обертання, необхідна для досягнення потрібної рівномірності розподілу компонентів, призводить до нераціональних надлишкових витрат енергії. Найбільш доцільно для замісу тістових напівфабрикатів використовувати штифтові робочі органи, які забезпечують необхідну ступінь змішування компонентів вже за 40 с від початку процесу. Завдяки невеликому опору при обтіканні тістом робочих органів такої форми стає можливим інтенсифікувати обробку шляхом збільшення частоти обертання. Це, в свою чергу, збільшує продуктивність тістомісильного обладнання. Однак слід простежити, щоб не відбувалося перегрівання тіста і при необхідності рекомендувати вносити відповідні зміни в конструкцію обладнання.

Як показали дослідження, розмішувати штифтовий перемішувачий пристрій слід на відстані 35...45 мм від днища. Відстань між штифтами повинна бути в межах 60...70 мм. При цьому їх потрібно розташовувати під кутом 120 один відносно одного.

Запропонована нова конструкція штифтових місильних органів (рис. 5), що являють собою три циліндричні стержні, розташовані по вершинах трикутника, при цьому один зі стержнів має діаметр в 3...6 рази більший, ніж діаметри інших двох.



Для обраної форми перемішувачого пристрою (штифтового) визначені сили опору та співвідношення їх складових (сили тиску і сили в'язкісного опору). З їх урахуванням наведена залежність для розрахунку проектної потужності приводу тістомісильних машин

На основі планів ЦКОП і ПФЕ побудовані магічно-статистичні моделі залежності в'язкості тіста від конструктивних параметрів робочого

Рис. 5. Схема місильного органу (відстані між штифтами l_1 , l_2 та діаметри Φ сі) і частоти його обертання. Отримані моделі використані для визначення раціональних значень вказаних керуваних параметрів.

Для лабораторної установки продуктивністю 50 кг/год, діаметром ємкості 0,27 м, визначені діаметр основного штифта $\phi=0,014$ м і діаметри двох допоміжних штифтів $\phi=0,005$ м. Запропоновано здійснювати обертання робочого органу в різних напрямках на стадії первинного змішування компонентів і пластифікації.

На етапі первинного змішування, коли суміш ще не утворила суцільну масу і має незначну в'язкість (опір руху незначний), обертання місильних органів відбувається в напрямку набігання потоку спочатку на стержень більшого діаметру (рис. 6а). Це зумовлює виникнення значної зони турбулізації потоку з великою кількістю турбулентних вихорів, за рахунок яких і відбувається перемішування компонентів. Стержні меншого діаметру розбивають вихорі, створені великим стержнем, на дрібніші, що зумовлює якісне перемішування на мікрорівні. Такий вплив на компоненти суміші зменшує необхідну тривалість первинного змішування компонентів.

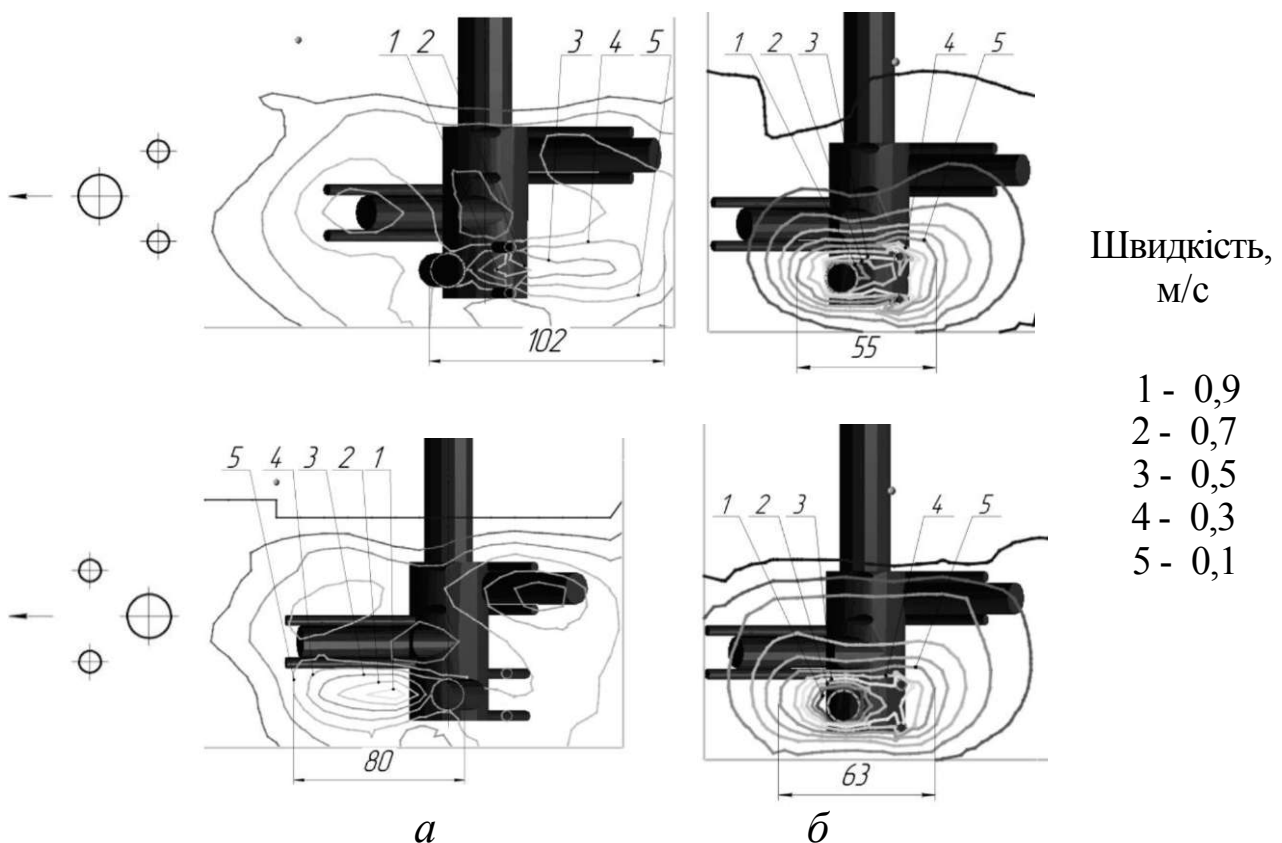


Рис. 6. Розподіл швидкості тіста в області проходження місильних лопатей при моделюванні етапів: а - перемішування; б - замісу.

Після завершення етапу первинного змішування компонентів, коли в'язкість суміші значно зростає, настає другий етап - безпосередньо замісу, і напрямок обертання валу з робочими органами змінюється на протилежний (рис. 6б). Тепер вже потік набігає спочатку на стержні меншого діаметру, які мають малий опір руху. Під їх дією в значній області продукту виникає зона пониженої в'язкості, в якій рухається стержень великого діаметра. Він відчуває менший опір руху, завдяки чому зменшуються витрати енергії та, зі зниженням

в'язкості продукту, виникає більша кількість циркуляційних вихорів. Область впливу більшого стержня зростає внаслідок створення загальної, від двох штифтів меншого діаметру, області малої в'язкості, в якій безпосередньо відбувається ефективний заміс.

Для визначеного виду і геометрії штифтових робочих органів створена математична модель, що описує витрати енергії під час замішування та враховує вшив структурно-механічних властивостей тіста (густини ρ і уявної в'язкості η), геометрії робочих органів (l та b) та режиму їх роботи (швидкість потоку u).

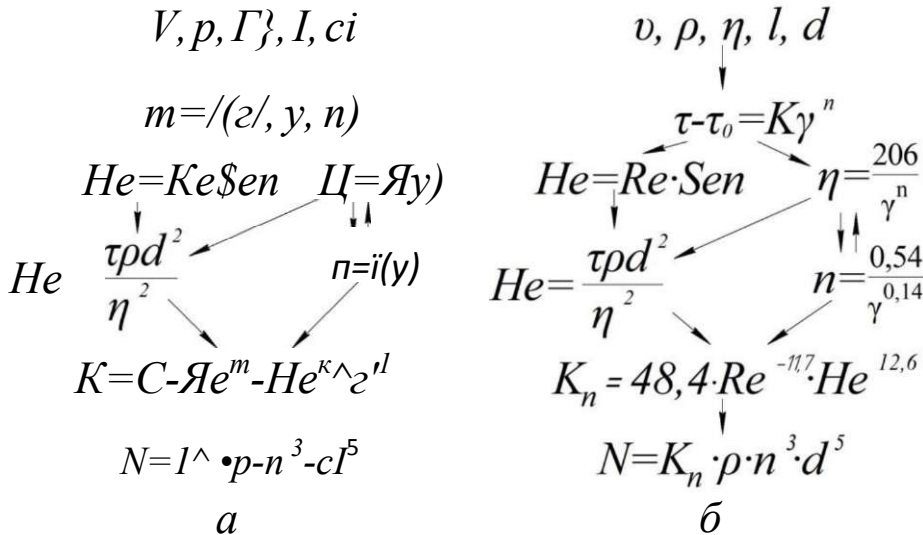


Рис. 7. Схема математичної моделі визначення витрат енергії в процесі замішування тіста:
а - постановка задачі,
б - кінцевий результат.

Використавши дані, отримані в ході математичного моделювання, були розраховані критерії подібності Рейнольдса $Яe$ і Хедстрема He . Оскільки роль сили тяжіння в процесі замісу хлібного тіста досить мала, значенням критерію Фруда $i\Gamma^*$ знехтували.

Для отримання значень коефіцієнта C та показників степені t та k критеріального рівняння використаний метод найменших квадратів.

У **четвертому розділі** представлені результати експериментальних досліджень процесу замішування тіста.

Основним показником, який визначається при дослідженні роботи тістомісильних машин, є величина питомої роботи замісу A_{Π} , яка прямо пропорційно залежить від загальної енергії, витраченої протягом цього процесу. Величина останньої суттєво впливає як на ефективність роботи машини, так і на якість готового виробу, оскільки визначає пік розвитку тіста.

$$A_{\Pi} = \frac{A - n - \Gamma}{\tau} \cdot \quad (6)$$

Для запропонованої конструкції тістомісильної машини питома робота становить приблизно 30 кДж/кг, що за загальноприйнятими класифікаційними ознаками дозволяє віднести її до машин інтенсивної дії.

Для визначення витрат загальної енергії замісу при проведенні фізичних експериментів використано метод інтегральних характеристик, тобто визначено площу поверхні, утворену кривою потужності замісу та віссю абсцис (час замісу). При математичному моделюванні витрати загальної енергії отримані

шляхом обчислення інтегральних характеристик турбулентної дисипації в робочому об'ємі (див. залежність 2).

Якщо конструкція елементів тістомісильного обладнання не змінюється, загальна енергія E і, відповідно, робота визначаються режимом роботи місильного органу (частотою обертання n), вологістю тіста та тривалістю процесу t (рис. 8).

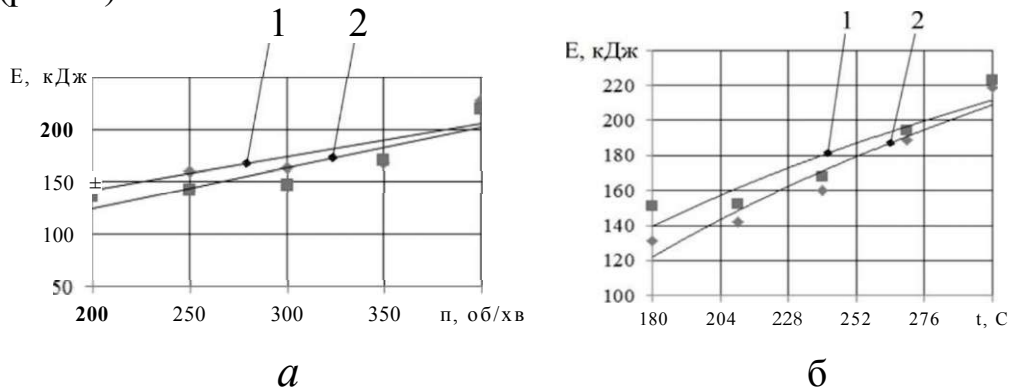


Рис. 8. Залежність витрат енергії на заміс від частоти обертання місильного органу (а) та тривалості процесу (б):
1 - фізичний експеримент; 2 - математичне моделювання.

Аналізуючи отримані дані можна стверджувати, що на витрати енергії E в процесі замішування суттєво впливає частота обертання місильних органів, при збільшенні якої лінійно зростає споживана енергія:

$$E = 97,3 + 0,244n. \quad (7)$$

Величина питомої роботи, що витрачається на заміс, A зростає з 24 кДж/кг до 33 кДж/кг при збільшенні частоти обертання вдвічі (від 200 до 400 об/хв).

Збільшення тривалості процесу в сукупності зі збільшенням частоти обертання місильного органу призводить до нелінійного збільшення витрат енергії, що недоцільно з точки зору економічних та технологічних показників:

$$E = 1,1t - 0,0013t^2 - 15,9. \quad (8)$$

При проведенні фізичного моделювання з'ясовано, що із підвищенням вологості тіста величина споживаної енергії зменшується внаслідок зниження в'язкості тіста:

$$E = 137,4w - 1,67w^2 - 2638,9. \quad (9)$$

Шляхом порівняння результатів фізичного моделювання і обчислювальних експериментів, реалізованих у пакеті Flow Vision, доведена адекватність математичної моделі. В середньому відхилення результатів становить 12,6%

Максимальна необхідна потужність замішування визначена методом пікових точок (рис. 9). Експерименти проведені для найбільш крутого тіста з розглянутих, вологістю 40%

Встановлена залежність максимальної потужності від частоти обертання місильних органів, яка є експоненційною:

$$N = 0,017e^{0,0035n}.$$

Зростання споживаної потужності при зміні частоти обертання пояснюється збільшенням сили опору місильного органу внаслідок зростання швидкості потоку, що набігає.

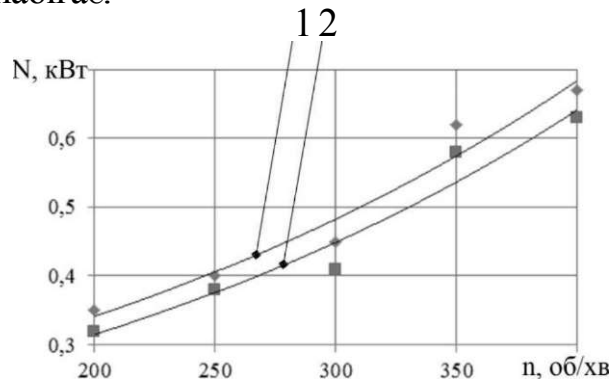


Рис. 9. Залежність максимальної потужності замішування від частоти обертання місильного органу: 1 - фізичний експеримент; 2 - математичне моделювання.

Відхилення між результатами фізичного і математичного моделювання з визначення максимальної потужності становить 6,7%

Частота обертання місильного органу запропонованої конструкції не повинна перевищувати 310 об/хв, оскільки це суттєво збільшує інтенсивність витрат енергії.

З використанням методу Протодияконова побудовані адекватні статистичні багатофакторні залежності витрат енергії E та розпливчатості тіста P від частоти обертання n , вологості тіста i і тривалості замісу t :

$$B = \frac{(97,3 + 0,244n) \cdot (137,4iu - 1,67iu^2 - 2638,9) \cdot (1,11 - 0,0013i^2 - 15,9)}{i}; \quad (Ю)$$

$$P = \frac{(87 + 0,02n) \cdot (2078 - 98,7iu + 1,22iu^2) \cdot (478 - 5,11 + 0,0221i^2 - 3,1 \cdot 10^{-5}t^3)}{8836}; \quad (11)$$

і запропонований спрощений варіант для інженерних розрахунків залежності витрат енергії:

$$E = 137,8 + 3,5n - 7,2ш + 9,51 \quad (12)$$

Розроблена конструкція тістомісильної машини повинна бути економічно ефективною і забезпечувати необхідну якість продукції, тому для визначення раціональних режимів її роботи вирішена задача пошуку компромісного рішення багатоцільової задачі оптимізації, сформульована на основі методів математичного програмування.

Ефективність роботи тістомісильної машини оцінюється по якості тістового напівфабрикату (критерієм обрано розпливчатість тіста P) та енерговитратам в процесі замішування (визначена загальна енергія E). Це одразу визначає критерії оптимізації: мінімізувати витрати енергії в процесі замішування та розпливчатість тіста, значне збільшення якої призводить до погіршення якості тіста та готових виробів.

Одним зі способів пошуку компромісного рішення є зведення багатоцільової задачі до задачі з однією цільовою функцією, в нашому випадку початкова постановка задачі виглядає наступним чином:

$$\begin{aligned} E n, w, t &\rightarrow \min; \\ P n, w, t &\rightarrow \min; \\ 200 < n &< 400; \\ 40 < w &< 44; \\ 180 < t &< 300. \end{aligned} \quad (13)$$

Для вирішення задачі оптимізації в програмному пакеті Mathcad 15 використано метод, оснований на алгоритмі Ньютона.

Встановлені рекомендовані значення параметрів: частота обертання 302 об/хв, вологість 41,77 % тривалість замісу 203 с.

Використовуючи умови рівності питомої витрати енергії ($NV=\text{const}$) в геометрично подібних машинах різних розмірів і рівності симплексів геометричної подібності, визначено основні конструктивні параметри тістомісильної машини промислового зразка (рис. 10) та виконано розрахунок її місильного органу на міцність.

Промисловий варіант запропонованого обладнання забезпечує продуктивність 530 кг/год Період повернення інвестицій при впровадженні тістомісильної машини зі шпифтовими робочими органами становить 2,3 роки.

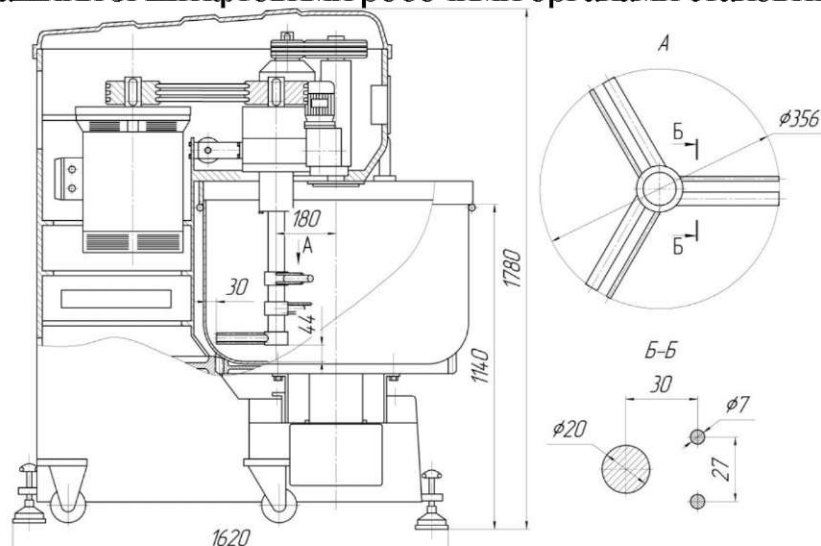


Рис. 10. Схема тістомісильної машини промислового зразка

ВИСНОВКИ

Необхідність розробки нових видів обладнання для замішування тіста обумовлена потребами зменшення споживання енергії та забезпечення показників якості тіста, які відповідають встановленим вимогам. Вирішення цього завдання передбачає як зміну конструкції робочих органів тістомісильних машин, так і режимів реалізації процесу замішування з урахуванням особливостей перебігу кожної з його стадій. В результаті виконання дисертаційної роботи запропонована нова конструкція тістомісильної машини

періодичної дії зі штифтовими робочими органами та визначені параметри, які забезпечать її ефективну роботу.

В результаті виконання роботи зроблені такі висновки:

1. Залежність між швидкістю деформації та в'язкістю тіста, яка адекватно описує поведінку тіста при замісі на стадії пластифікації в діапазоні швидкостей зсуву $0.4 \dots 1300 \text{ с}^{-1}$, має вигляд:

$$\tau_j = 206 \text{ ГПа}.$$

2. Швидкість деформації істотно впливає на індекс течії: $n = 0,54 \text{ у}^{0,44}$. Результати використані при математичному моделюванні процесу змішування.

3. Стадії первинного змішування компонентів і пластифікації тіста слід моделювати окремо, що обумовлено відмінностями властивостей відповідних систем, які зазнають механічного впливу, і механізмом перебігу цих стадій. Адекватність створених математичних моделей підтверджена порівнянням результатів фізичного і математичного моделювання. Відхилення становить 12,6%.

4. Достатньо рівномірний розподіл компонентів та необхідну швидкість на стадії первинного змішування забезпечує використання спіральних, штифтових і лопатевих робочих органів. З'ясовано, що тривалість етапу первинного змішування для спірального місильного органу становить 55 с, для штифтового - 40 с, лопатевого - 34 с.

5. На інтенсивність утворення циркуляційних вихорів впливають в'язкість суміші, геометрія місильних органів та швидкість руху продукту в ємкості. Найбільший розмір зон, де спостерігається активне перемішування, характерний для штифтових робочих органів з круглим поперечним перерізом. На основі аналізу зон, в яких спостерігається утворення циркуляційних вихорів, рекомендовано забезпечувати такі відстані між кромками робочих органів і поверхнями обладнання: для рамних перемішувачів 85-90 мм, спіральних і штифтових 40-50 мм, лопатевих 50-60 мм.

6. Для замісу пшеничного дріжджового тіста доцільно використовувати обладнання зі штифтовими робочими органами, з яких один - основний, більшого діаметру, і два - допоміжні, менші. Такі перемішувачі пристрої здатні забезпечити ефективну реалізацію як стадії первинного змішування компонентів, так і пластифікації. Слід змінювати напрямок обертання робочих органів: на стадії первинного змішування погрібно забезпечити набігання потоку спочатку на стержень більшого діаметру, на стадії пластифікації - навпаки.

Рациональними геометричними параметрами штифтових робочих органів для лабораторної установки, визначеними з використанням теорії ПФЕ та аналітичних методів пошуку екстремумів, є: відстані між штифтами $l_1=0,02 \text{ м}$, $l_2=0,019 \text{ м}$, діаметр більшого штифта $D=0,014 \text{ м}$, діаметр допоміжних стержнів $d=0,005 \text{ м}$.

7. Отримувати дані, необхідні для визначення проектної потужності приводу тістомісильних машин, доцільно в програмному комплексі Flow Vision на основі аналізу інтегральних характеристик сил опору. Зменшувати

в'язкісну складову сили опору можливо за рахунок вибору найбільш раціонального співвідношення діаметра штифтового робочого органу (20..30 мм) та частоти його обертання (250.300 об/хв).

8. Критеріальне рівняння для визначення потужності, необхідної для замішування тіста, має вигляд:

$$K_{\Pi} = 48,4 \cdot \text{Яе}^{11,7} \cdot \text{Не}^{12,6}.$$

Залежність витрат потужності на замішування від частоти обертання робочих органів, отримана з використанням методу пікових точок, має вигляд: $N = 0,017e^{0,0035\Pi}$.

Розузгодження результатів фізичного і математичного моделювання становить 6,7 %

9. Витрати загальної енергії на замішування залежать від частоти обертання місильного органу, вологості тіста і тривалості замісу. Питома робота, що витрачається на заміс тіста в машині запропонованої конструкції, становить близько 30 кДж/кг, що дає можливість віднести її до інтенсивних.

Спрощена формула для інженерних розрахунків витрат енергії при замішуванні має вигляд: $E = 137,8 + 3,5 \Pi - 7,2\Pi + 9,5Г$.

Значення вологості тіста при його замішуванні в тістомісильній машині слід обмежити 40..42% що забезпечує дотримання вимог щодо якості тістових напівфабрикатів.

Компромісними значеннями параметрів, які забезпечують найбільшу ефективність реалізації процесу замішування при відповідних показниках якості, є: частота обертання 302 об/хв, вологість тіста 41,77% тривалість замішування 202,8 с.

10. Промисловий варіант запропонованого обладнання, розрахований на основі рівності питомої витрати енергії в геометрично подібних тілах, забезпечує продуктивність 530 кг/год. Період повернення інвестицій при впровадженні тістомісильної машини зі штифтовими робочими органами становить 2,3 роки.

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Литовченко І. М. Моделювання робочих процесів у тістомісильних машинах зі спіральними робочими органами / І. М. Литовченко, М. С. Шпак // Наукові праці Національного університету харчових технологій. — 2006. — № 18. — С. 69-71.

2. Литовченко І. Визначення якості замісу та оптимальної форми робочих органів тістомісильних машин / І. Литовченко, М. Шпак // Хлібопекарська і кондитерська промисловість України. — 2008. — № 6 (43). — С. 20-22.

3. Литовченко І. М. Визначення раціональної конструкції тістомісильних машин шляхом комплексного моделювання робочих процесів / І. М. Литовченко, М. С. Шпак // Наукові праці Національного університету харчових технологій. — 2008. — № 25, Ч2. — С. 86-87.

4. Литовченко І. М. Визначення раціональних параметрів первинного змішування компонентів в тістомісильних машинах / І. М. Литовченко, М. С. Шпак // Харчова промисловість. — 2008. — № 7. — С. 49-51.

5. Литовченко І. М. Визначення параметру нелінійності реологічних рівнянь при описанні процесу перемішування хлібного тіста / І. М. Литовченко, М. С. Шпак // Наукові праці НУХТ. — 2010. — С. 85-87.

6. Моделирование технологических процессов при создании оборудования пищевой промышленности / И. Литовченко, М. Шпак, С. Стефанов, В. Хаджийски // Научни трудове на Русенския Университет. — 2010. — Т. 49, серия 9.2. — С. 50-55.

Особистий внесок до п. 1-6: літературний огляд, аналіз способів замісу хлібного тіста; обґрунтування нової конструкції місильного органу; підготовка матеріалів до публікації.

7. Литовченко І. М. Порівняльний аналіз програмних продуктів для моделювання руху рідин / І. М. Литовченко, М. С. Шпак // Тези доповідей 71-ї наукової конференції молодих вчених аспірантів і студентів. 18 - 19 квітня 2005 р. — К : НУХТ, 2005. — Ч 2. — С. 41.

8. Литовченко І. М. Моделювання робочих процесів в тістомісильних машинах із спіральними робочими органами / І. М. Литовченко, М. С. Шпак // Тези доповідей 9-ї Міжнародної науково-технічної конференції "Нові технології та технічні рішення в харчовій та переробній промисловості: сьогодення і перспективи, 17-19 жовтня 2005 р. — К : НУХТ, 2005. — С. 24-25.

9. Шпак М. С. Залежність енергетичних параметрів перемішування від реологічних показників продукту / М. С. Шпак, І. М. Литовченко // 72-а наукова конференція молодих учених, аспірантів і студентів, 17-18 квітня 2006 р. — К : НУХТ, 2006. — С. 38.

10. Шпак М. С. Визначення якості перемішування в'язких мас місильними органами різної геометричної форми / М. С. Шпак, І. М. Литовченко // 73-а наукова конференція молодих учених, аспірантів і студентів, «Наукові здобутки молоді - вирішенню проблем харчування людства у XXI ст.», 23-24 квітня 2007 р. — К : НУХТ, 2007. — С. 35.

11. Шпак М. С. Визначення якості первинного змішування компонентів в тістомісильних машинах / М. С. Шпак, І. М. Литовченко // 74-а наукова конференція молодих учених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті», 21-22 квітня 2008 р. — К : НУХТ, 2008. — С. 229.

12. Шпак М. С. Визначення впливу в'язкості хлібного тіста на питому роботу замісу при моделюванні роботи тістомісильних машин / М. С. Шпак, І. М. Литовченко // 75-а наукова конференція молодих учених, аспірантів і студентів, 13-14 квітня 2009 р. — К : НУХТ, 2009. — С. 227.

13. Шпак М. С. Визначення реологічних параметрів первинного змішування компонентів в тістомісильних машинах / М. С. Шпак, І. А. Яшенко // I Міжнародна науково-практична конференція "Науково-технічна творчість

студентів з процесів і обладнання харчових виробництв", 22-23 жовтня 2009 р. —Донецьк : ДонНУЕТ, 2009. — С. 24-25.

14. Шпак М. С. Визначення основних конструктивних параметрів тістомісильних органів / М.С. Шпак, І.М Литовченко // Тези доповідей 76-ої наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді - вирішенню проблем харчування людства у ХХІ столітті», 12-13 квітня 2010р. — К : НУХТ, 2010. —Ч 2. — С. 112.

15. Шпак М. С. Гидродинамический и энергетический расчет тестомесильных машин методом компьютерного моделирования / М. С. Шпак, І.М Литовченко // Тезисы докладов VII Международной научной конференции студентов и аспирантов «Техника и технология пищевых производств» 22-23 апреля 2010 г. —Могилев : УО "МГУП", 2010. —Ч 2. — С. 102.

16. Шпак М. С. Моделирование основных процессов в оборудовании пищевой промышленности / М. С. Шпак, И. Н. Литовченко // Инженерные системы: тезисы докладов, международная научно-практическая конференция. —М : РУДН, 2011. — С. 4.

17. Шпак М. С. Проектирование смесителей с использованием компьютерного моделирования / М. С. Шпак, И. Н. Литовченко // Техника и технология пищевых производств: тез. докл. VIII Междунар. науч.-техн. конф. - Могилев : УО "МГУП", 2011. —Ч 2. —С. 87-88.

18. Литовченко И. Н. Определение потребляемой мощности при замесе теста на основе учета сил сопротивления / И. Н. Литовченко, М. С. Шпак, С. В. Стефанов // Инновационные технологии в производстве и переработке сельскохозяйственной продукции: доклады Международной научно-практической конференции, 14-15 апреля 2011 г. — Минск : БГАТУ. — С. 64-67.

19. Шпак М. С. Определение рациональных параметров замеса хлебного теста цилиндрическими рабочими органами / М. С. Шпак, И. Н. Литовченко // Тезисы докладов региональной научно-практической конференции "Молодежь и научно-технический прогресс", апрель-июль 2011г. —Владивосток : ДВГТУ, 2011. —Ч 1. —С. 344-346.

20. Litovchenko I. Mixer's design method with computer modeling / I. Litovchenko, MShpak, S. Stefanov, W. Hadjiiskij //11 International Conference "Research and Development in Mechanical Industry", 15-18 September 2011 . — Sokobanja : SaTCIP. — 2011. — V. 1 —P. 533-538.

21. Горбач О. Аналіз впливу форми робочих органів тістомісильних машин на ефективність процесу замісу / Ольга Горбач, Олена Чепелюк, Максим Шпак // Наукові здобутки молоді - вирішенню проблем харчування людства у ХХІ столітті : програма і матеріали 80-ї міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів, 10-11 квітня 2014 р. —К : НУХТ, 2014. —Ч 2. —С. 46-48.

22. Горбач О. Влияние формы месильных органов на эффективность процесса замеса теста / О. Горбач, Е. Чепелюк, М Шпак // Сборник научных статей по материалам XV Международной студенческой научной конференции

«Технология хранения и переработки сельскохозяйственной продукции»: Гродно : ГГАУ, 2014. — С. 37-39.

Особистий внесок до п. 7 - 22: літературний огляд, постановка задачі проведення математичного моделювання; розробка методики досліджень їх проведення; опрацювання та узагальнення експериментальних даних; підготовка матеріалів до публікації, підготовка тез доповідей.

23. Патент 34601, МПК (2006) A21C 1/00 Тістомісильна машина / Шпак М. С., Литовченко І. М., Вільховий А. В., Вільховий В. А. ; заявник Національний університет харчових технологій. — № и200805300; заявл. 23.04.2008; опубл. 11.08.2008, Бюл. № 15. — 5 с.

24. Патент 55320, МПК (2009) A21C 1/00 Тістомісильна машина / Шпак М. С., Литовченко І. М., Яшрнко І. А. ; заявник Національний університет харчових технологій. — № и201006764; заявл. 01.06.2010; опубл. 10.12.2010, Бюл. № 23, Бюл. № 15. — 4 с.

25. Патент 65468, МПК (2011.01) A21C1/00 A21C7/00 Тістомісильна машина / Шпак М. С., Литовченко І. М. ; заявник Національний університет харчових технологій. — № и201105321; заявл. 26.04.2011; опубл. 12.12.2011, Бюл. № 23. — 4 с.

26. Патент 98577 Щ МПК A21C 1/02 (2006.01) Тістомісильна машина / Шпак М. С., Литовченко І. М.; заявник Національний університет харчових технологій. — № а201105303; заявл. 26.04.2011; опубл. 25.05.2012, Бюл. № 10. — 8 с.

Особистий внесок до п.23-26: патентний пошук, розробка конструкції обладнання, підготовка матеріалів заявок.

АНОТАЦІЯ

Шпак М. С. Моделювання замішування тіста та визначення раціональних параметрів робочих органів тістомісильних машин. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.18.12 - процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв. - Національний університет харчових технологій, Київ, 2015.

Дисертаційна робота присвячена моделюванню замішування тіста та визначенню раціональних геометричних параметрів робочих органів тістомісильних машин і режимів їх роботи.

На основі аналізу літературних джерел отримані функціональні залежності в'язкості тіста та індексу течії від швидкості деформації, які використані в подальшому при математичному моделюванні. Проаналізовано вплив виду робочого органу на ефективність замішування для стадій первинного змішування компонентів і пластифікації. Визначені геометричні параметри робочої зони, в якій відбувається інтенсивний заміс, а також форма робочого органу, якій слід надавати перевагу - штифтова. З урахуванням

отриманих результатів запропонована конструкція штифтового мисильного органу.

Розроблена експериментальна установка та проведено фізичне моделювання процесу замішування. В результаті виконання досліджень отримані раціональні параметри режимів роботи тістомісильної машини. Розузгодження результатів фізичного і математичного моделювання для різних моделей становить 6,7...12,6 %

Запропонована конструкція тістомісильної машини зі штифтовими робочими органами продуктивністю 530 кг/год Період повернення інвестицій при її впровадженні становить 2,3 роки.

Ключові слова: тістомісильна машина, замішування, тісто, моделювання, штифтовий робочий орган.

АННОТАЦИЯ

Шпак М С Моделирование замешивания теста и определения рациональных параметров рабочих органов тестомесильных машин. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.18.12 - процессы и оборудование пищевых, микробиологических и фармацевтических производств. - Национальный университет пищевых технологий, Киев, 2015.

Диссертация посвящена моделированию замешивания теста и определению рациональных геометрических параметров рабочих органов тестомесильных машин и режимов их работы.

На основе анализа литературных источников получены функциональные зависимости вязкости теста и индекса течения от скорости деформации, использованные в дальнейшем при математическом моделировании.

Стадии перемешивания и замеса промоделированы отдельно, что обусловлено различиями свойств соответствующих систем, испытывающих механическое воздействие, и механизмом протекания этих стадий. Эффективность первой стадии определялась временем перемешивания компонентов до нужной концентрации, эффективность второй - созданием большей зоны активного перемешивания. Исследован процесс образования циркуляционных вихрей, на основе которого рекомендованы расстояния размещения рабочих органов в месильной деже. Доказано, что наиболее рациональной конструкцией перемешивающего устройства является штифтовая. Рассчитаны ее геометрические параметры. Обеспечить наибольшую эффективность работы тестомесильных машин с штифтовыми рабочими органами может соблюдение определенного соотношения диаметра рабочего органа и скорости его движения. Рекомендуется использовать штифтовые рабочие органы диаметром 20.30 мм при частотах вращения 250.300 об/мин.

Большое внимание уделено определению затрат энергии на замешивание, при этом использованы две методики - интегральных характеристик и пикового развития теста. При математическом моделировании общая работа на

замешивание рассчитана на основе диссипации энергии, при физическом - интегрированием кривых мощности. Для определения пикового развития теста рассчитана сила сопротивления.

Разработана экспериментальная установка и проведено физическое моделирование процесса замешивания. В результате выполнения исследований получены рациональные параметры режимов работы тестомесильной машины. Отклонение результатов физического и математического моделирования для различных моделей составляет 6,7... 12,6%

С использованием метода Прогодяконова получены адекватные многофакторные зависимости затрат энергии и распычатости теста от частоты вращения, влажности теста и продолжительности замешивания. Они могут быть использованы для инженерных расчетов.

Для установленного в/дд и геометрии штифтовых рабочих органов создана математическая модель, описывающая затраты энергии во время замешивания и учитывает влияние структурно-механических свойств теста (плотности и кажущейся вязкости), геометрии рабочих органов и режима их работы (скорости потока).

На основе полученных математических зависимостей установлено, что не существует оптимальных параметров, при которых процесс следует реализовывать. Однако была решена компромиссная задача, для которой в установленных пределах рассмотренных параметров определены рекомендованные их значения: частота вращения 302 об/мин, влажность теста 41,88/ продолжительность замеса 203 с.

Предложена конструкция промышленной тестомесильной машины с штифтовыми рабочими органами производительностью 530 кг/ч. Период возврата инвестиций при ее внедрении составляет 2,3 года.

Ключевые слова: тестомесильная машина, замешивание, тесто, моделирование, штифтовой рабочий орган.

SUMMARY

Shpak M. S. Modeling kneading and working definition of rational parameters of kneading machines. - Manuscript.

The thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.18.12 - processes and equipment for food, pharmaceutical and microbiological industries. - National University of Food Technologies, Kyiv, 2015.

The thesis is devoted to modeling kneading and rational determination of geometric parameters of working kneading machines and their operation modes.

Based on the analysis of the literature obtained functional viscosity of the dough and flow index of deformation, which are used later in the mathematical modeling. The influence of the type of working body on effectiveness of initial mixing and plastification were analyzed. Identified the geometric parameters of the working area in which an intensive mixing and form working body, which is the preferred - pin. In view of the results proposed construction of the pin body.

The developed experimental setup and conducted the physical modeling mixing of process. As a result of the research, rational modes of operation parameters

of dough machine. Mismatch results of physical and mathematical modeling for different models is 6,7... 12,6%

The design of the dough machine with pin working bodies was proposed. Productivity of machine 530 kg/h. Payback period in it's implementation is 2,3 years.

Keywords: kneading machine, kneading dough, modeling, pin body.