

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

**ДЕРКАЧ АНДРІЙ ВАСИЛЬОВИЧ**

УДК 664.61

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ НАГНІТАННЯ ТІСТА  
ОБЕРТОВИМИ ВАЛКАМИ У ФОРМУВАЛЬНІЙ МАШИНІ**

05.18.12 «Процеси та обладнання харчових,  
мікробіологічних та фармацевтичних виробництв»

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2018

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник** доктор технічних наук, професор  
**Стадник Ігор Ярославович**,  
Тернопільський національний  
технічний університет імені Івана Пулюя,  
професор кафедри обладнання  
харчових технологій

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Паламарчук Ігор Павлович**,  
Національний університет біоресурсів  
і природокористування України,  
професор кафедри процесів  
і обладнання переробки продукції АПК

кандидат технічних наук, доцент  
**Ковальов Олександр Володимирович**,  
Національний університет харчових технологій,  
доцент кафедри машин і апаратів  
харчових та фармацевтичних виробництв

Захист відбудеться «16» листопада 2018 року о 10<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.004.22 у Національному університеті біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 15, навчальний корпус № 3, кімната 301

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Національного університету біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 13, навчальний корпус № 4, кімната 41а

Автореферат розіслано «12» жовтня 2018 року

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Н. М. Слободянюк

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Прагнення промислових кіл задовольнити потреби населення України в різноманітних кондитерських виробах із борошна диктує необхідність значного розширення їх асортименту. Переробка в'язких мас з умістом борошна здійснюється на різних видах та типах технологічного обладнання з використанням як вітчизняного, так і закордонного виробництва. Значна кількість існуючих на сьогодні конструктивних виконань формувальних, тістоподільних, розкачувальних, змішувальних машин з валковими робочими органами зумовлена не лише відмінністю структурно-механічних характеристик в'язкого середовища, умовами роботи, функціональним призначенням та конструкцією робочих органів, а й недосконалістю, і, в деяких випадках, відсутністю науково обґрунтованого методологічного підходу до проектування такого класу машин.

Недостатнє висвітлення питань, пов'язаних з науковим обґрунтуванням визначення раціональних параметрів валкових робочих органів формувальних машин значною мірою стримує їх технічний розвиток і призводить до появи технічно недосконалого обладнання та зайвих витрат на його конструювання, виготовлення й експлуатацію. Тому існує потреба у доповненні знань взаємодії обертових валків із в'язким середовищем й розробленні нагнітального вузла в формувальних машинах. Це розроблення повинно базуватися на основі гідродинамічних та конструктивних підходів до геометрії й параметрів валкового робочого органу. Такий підхід дозволить не лише забезпечити вимоги надійності з функціональності, продуктивності й якості продукції, а й дасть можливість мінімізувати виробничі та експлуатаційні витрати.

Саме тому потреба у пошуку нових методик та обґрунтування раціональних параметрів валкових робочих органів при дії на в'язкі маси зумовлює вибір їх оптимального компонування та конструктивного виконання й визначає актуальність даної роботи.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертацію виконано відповідно до завдань, викладених у плані науково-дослідницьких та дослідно-конструкторських розробок Міністерства аграрної політики України (наказ № 164 від 20.03.2008 р. «Про затвердження галузевої програми розвитку хлібопекарської галузі на період до 2015 р.»). Робота відповідає науковому напряму кафедри обладнання харчових технологій Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя за темами «Інтенсифікація технологічних процесів харчових виробництв шляхом використання новітніх методів замішування тіста» і «Розробка нового методу технічного діагностування стану зварних швів магістральних газопроводів на основі статистичного аналізу їх структурної неоднорідності» (номер державної реєстрації 0117U002245). Крім того, основні положення дисертації пов'язані з виконанням науково-дослідних договорів про творчу співпрацю Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя з ПАТ «ТерА» (договір № 31 від 23.04.2015 р.).

**Мета та завдання дослідження.** Мета дисертаційного дослідження – підвищення функціональних можливостей валкових робочих органів формувальної машини шляхом розроблення та обґрунтування раціональних конструктивно-технологічних параметрів процесу нагнітання.

Для досягнення поставленої мети визначено й вирішено такі завдання:

- проаналізувати теоретичні засади й особливості дії валкових робочих органів на тісто;
- визначити ступінь впливу геометричних параметрів валків на структурно-механічні показники тіста у вузлі нагнітання формувальної машини;
- запропонувати шляхи удосконалення існуючих валкових робочих органів;
- провести розрахунки з досягнення оптимального характеру течії тіста між валками та обґрунтувати конструктивне вирішення промислового зразка;
- визначити вплив параметрів обертових валків на температурний режим, створення тиску, необхідної потужності при нагнітанні й розкачуванні тіста;
- розробити математичне моделювання процесу взаємодії поверхні валків з тістом; на основі аналітичних залежностей встановити технологічні параметри, які забезпечують ефективність вузла нагнітання;
- розробити принципово нові конструкції валкових робочих органів для вузла нагнітання з його модернізацією (або удосконаленням);
- виконати експериментальну перевірку достовірності запропонованих рішень і надати рекомендації щодо раціональних конструктивно-технологічних параметрів;
- здійснити заходи апробації розроблених наукових положень у виробничих умовах та перевірити технологічний процес взаємодії поверхні валків з тістом у вузлі нагнітання.

*Об'єкт дослідження* – технологічний процес нагнітання тіста.

*Предмет дослідження* – технологічні, конструктивні й енергетичні параметри процесу нагнітання дріжджового тіста між обертовими валками у взаємозв'язку з якісними показниками напівфабрикату й готової продукції.

**Методи дослідження.** Теоретичні та експериментальні дослідження базуються на основних положеннях технології дріжджового борошняного виробництва, математичного моделювання, механіки рідини, теплофізики, фізики та механіки полімерних матеріалів (реології). Експериментальні дослідження процесу виробництва бубличної продукції на нових валках виконано на існуючому технологічному обладнанні з використанням спеціально розробленої технологічної оснастки на підприємстві ПАТ «ГерА».

**Наукова новизна одержаних результатів.** Науково-технічно обґрунтовано основні конструктивні та технологічні параметри й встановлено закономірності їх впливу на процес нагнітання тіста валками нової конструкції для бубличних виробів.

Запропоновано математичні моделі процесу нагнітання тіста, що встановлюють залежності структурно-механічних властивостей тіста від технологічних і конструктивних параметрів.

Визначено закономірності зміни температурних потоків у процесі нагнітання, що залежать від деформації та в'язкого тертя тіста.

Встановлено закономірності розподілу швидкостей, тиску, крутного моменту при нагнітанні тіста із урахуванням зміни геометричних характеристик валків, технологічних параметрів та реологічних характеристик напівфабрикату.

**Практичне значення одержаних результатів.** Розроблено конструкцію нових валкових робочих органів, спрямованих на створення високоефективного нагнітання тіста, які в міру своєї циклічності призводять до плавного ефекту течії тіста; визначено раціональні характеристики циліндрично-гвинтового валка та параметри його поведінки при нагнітанні. Запропоновано конструкцію вузла нагнітання й технологічний процес для виготовлення бублика «Подільський», що базуються на даних математичного моделювання. На основі теоретичних узагальнень, результатів математичного моделювання та експериментальних досліджень запропоновано науково обґрунтовані конструктивно-технологічні параметри процесу нагнітання тіста, що пройшли успішну апробацію на ПАТ «ТерА» (м. Тернопіль). Упроваджено у виробництво нову конструкцію валків на з річним економічним ефектом 87,3 тис. грн за рік. Результати досліджень використовуються у навчальному процесі при викладанні дисципліни «Технологічне обладнання хлібо-пекарського і бродильного виробництва» кафедри обладнання харчових технологій Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя. Новизна отриманих результатів підтверджена 4 патентами України на конструкції нагнітального вузла та валків.

**Особистий внесок здобувача.** Основні теоретичні та експериментальні дослідження за темою дисертації автором виконано самостійно. Здійснено вибір предмета досліджень, запропоновано математичні методи моделювання технологічних процесів нагнітання тіста, які забезпечують підвищення споживчих властивостей бубликів та надійність валків за рахунок їх нової геометричної поверхні. Здобувачу належать основні ідеї в опублікованих наукових працях, отриманих патентах, аналізі та узагальненні результатів роботи.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертації доповідались, обговорювались і отримали позитивну оцінку на: VI Міжнародній науково-практичній конференції вчених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства» (м. Київ, 2016 р.); VII Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування» (м. Херсон, 2016 р.); VII Міжнародній науково-практичній конференції «Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства» (м. Київ, 2017); IV Міжнародній науково-технічній конференції «Стан і перспективи харчової науки та промисловості» (м. Тернопіль, 2017 р.); Міжнародній науково-технічній конференції, присвяченій 40-вій річниці створення Проблемної

науково-дослідної лабораторії Національного університету харчових технологій «Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті Євроінтеграції» (м. Київ, 2017 р.).

**Публікації.** Основні положення дисертації опубліковано у 34 наукових працях, з яких 2 статті у наукових фахових виданнях України, 4 статті у наукових фахових виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз даних, стаття у науковому виданні іншої держави, 6 статей в інших наукових виданнях, 4 патенти України на корисну модель та 17 тез наукових доповідей.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 218 сторінок. Робота містить 12 таблиць та 47 рисунків. Список використаних джерел налічує 131 найменування.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи; показано її зв'язок з науковими темами; сформовано наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, що винесені на захист; визначено особистий внесок здобувача; наведено інформацію щодо апробації результатів дисертації та публікацій, в яких висвітлено її основні результати.

У першому розділі «**Аналіз функціональних схем машин із валковими робочими органами та показників їх роботи**» проаналізовано відомі теоретичні й експериментальні дослідження, пов'язані з аналізом конструкції валкових робочих органів у машинах для поділу, формування, закачування, розкачування тіста й суть процесу в умовах деформаційного технологічного впливу. Розглянуто процеси нагнітання борошняного тіста, що зумовлено капілярно-пористою структурою, в порах якого утримується достатня кількість газоподібних продуктів бродіння і які частково втрачають газ, зменшуються в об'ємі та ущільнюються. Велику роль у розвитку формувальних машин і теорії розкачування маси тіста відіграли роботи, засновані на фундаментальних працях з реології Б. М. Азарова, В. В. Бондаренко, М. П. Воларовича, К. П. Гуськова, М. Ж. Єркебаєва, А. М. Маслова, Ю. А. Мачихіна, С. А. Мачихіна, Б. А. Ніколаєва, В. А. Панфілова, П. А. Ребіндера, а також наукові дослідження з оптимізації течії тіста Н. В. Зайцевої, О. Т. Лісовенка, І. Я. Стадника та ін.

Розглянуто класифікацію даного класу машин, способи розкачування, здійснено порівняльний аналіз конструкцій. Наведено результати оцінювання основних деформаційних параметрів із різними схемами збудження колового дискретного руху валкових робочих органів та основні параметри, що визначають вибір та ефективність їх експлуатації. Розглянуто механіку неньютонівських рідин і реологію дисперсних систем, визначено напрями сучасних досліджень у цій галузі. Стисло описано удосконалення конструкцій форми валкових робочих органів, що забезпечать якісне стискання й транспортування з мінімальним нагріванням маси протягом процесу.

Враховуючи недостатній рівень науково-технічного розгляду проблеми удосконалення дії валкових робочих органів, актуальним є обґрунтування конструктивних і технологічних параметрів при проектуванні нових валків для формування тіста заданої якості, форми та розмірів.

У другому розділі «**Організація, предмети, матеріали й методи теоретичних та експериментальних досліджень**» розглянуто теоретичні передумови опису процесу розкачування тіста між валками, що обертаються назустріч один одному. Наведено загальний план проведення теоретичних та експериментальних досліджень з розроблення нових конструкцій валків із використанням математичного та комп'ютерного моделювання. Визначено предмети й матеріали дослідження, структурно-механічні й реологічні властивості, показники якості.

Опрацювання експериментальних даних та графічне оформлення роботи здійснено за допомогою комп'ютера з використанням такого програмного забезпечення: OriginPro 2015, SOLIDWORKS 2016, КОМПАС 3D V15, MathCad 15, Microsoft Office Excel 2003.

Для дослідження процесів, що впливають на формування тіста в машині Б-4-58, розроблено і змонтовано вузол нагнітання з новими валками (рис. 1).

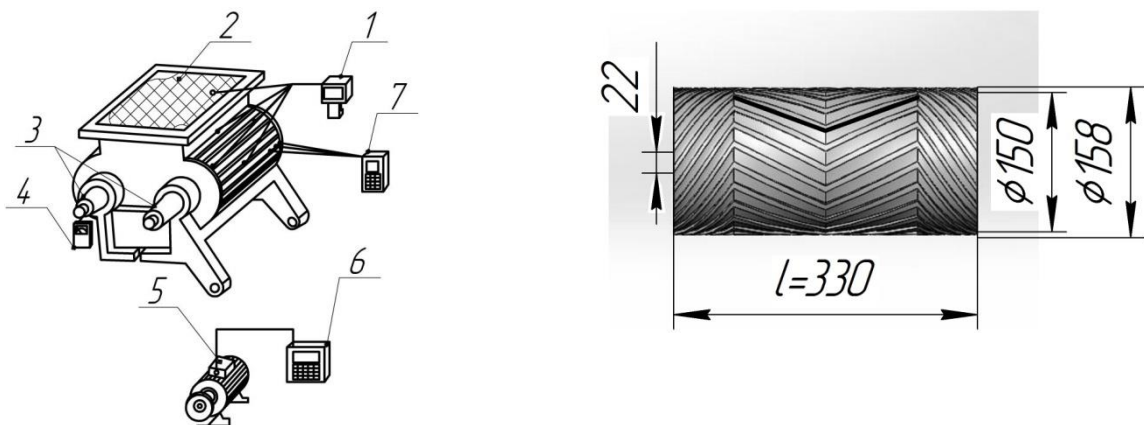


Рис. 1. Схема експериментальної установки: а) 1 – тепловізор; 2 – тісто; 3 – вали; 4 – тахометр; 5 – електродвигун; 6 – ватметр; 7 – потенціометр; б) валок нової конструкції

У третьому розділі «**Теоретичні та експериментальні дослідження процесу формування тіста валковими робочими органами**» наведено фізичну суть механізму формування, характер розвитку деформації, розглянуто процес розкачування та нагнітання тіста. Встановлено, що маса тіста, потрапляючи в зону дії валків, отримує деформації з моменту утворення течії між валками. Форму течії розглянуто як розкачування пружно-в'язкого еластичного шару тіста по несучій поверхні валків (рис. 2), який багаторазово проходить через усі ділянки робочої камери вузла нагнітання та піддається деформаціям, які відповідають цим дільницям. Деформаційні впливи служать вихідними даними для розрахунку конструктивних параметрів і технологічного процесу. Для аналітичного дослідження умов їх контактування, а також для розв'язування задач, пов'язаних із оцінюванням пружно-деформованого стану

зони контакту, розроблено реологічну модель, математичний опис якої потрібен не лише для об'єктивного оцінювання консистенції тіста за короткий процес, а й для можливості оцінити його поведінку на всіх стадіях деформації відповідно до тіл Максвелла, Бінгама, Шведова. Для описування текучості тіста між валками прийнятним є загальне рівняння реологічної моделі нагнітання

$\dot{\gamma} = \frac{\dot{\theta}}{G} + \frac{\theta}{\eta} + \frac{\dot{\theta}}{G}$ . Інтегрувавши його, отримуємо:  $\theta = \theta_0 e^{-\frac{G}{2\eta}t}$ , де  $\theta$  – напруження зсуву, кПа;  $\theta_0$  – межа плинності (початкове напруження зсуву), кПа;  $\eta_{пл}$  – пластична в'язкість, Па\*с;  $\dot{\gamma}$  – швидкість зсуву,  $s^{-1}$ ; модуль зсуву  $G$ .

Функціонування технологічного процесу роботи вузла нагнітання (рис. 3) характеризується дискретною течією тіста, де критична швидкість його руху, за якої вперше настає пластична деформація, має вигляд

$$\omega_{кр} = \left\{ \left[ \sqrt{3} * \theta_0 * (R_2^2 - R^2) \right] / \rho * R \sqrt{3R_2^2 + R^2} \right\}^{0.5}, \text{ рад/с}, \quad (1)$$

де  $R$  – радіус валка, м;  $R_2$  – радіус валка з шаром тіста на ньому, м;  $\rho$  – густина тіста,  $кг/м^3$ ;  $\theta_0$  – початкове напруження зсуву, кПа.

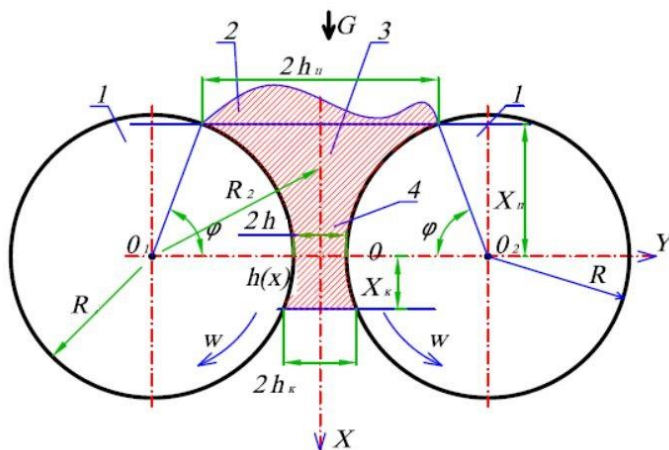


Рис. 2. Схема руху тіста у вертикальному зазорі між валками: 1 – валки; 2 – тісто; 3, 4 – перша (протитокова) і друга (прямотокова) зони в'язко-пластичної течії зсуву

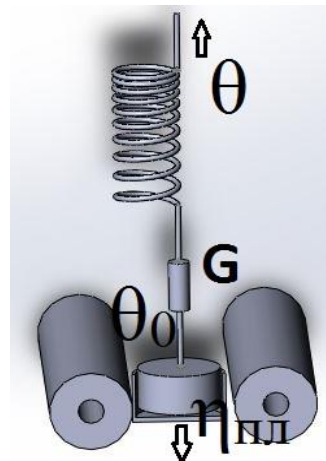


Рис. 3. Реологічна модель тіста при нагнітанні валками

У цьому контексті для ефективного транспортування тіста потрібно забезпечити асиметрію діючих сил його стискання, що визначаються геометрією валків робочим об'ємом та кутом затягування. Тобто

$$P_{\beta} = \sqrt{3} * \theta_0 * (R_2^2 - R^2) / \sqrt{3R_2^2 + R^2}, \text{ Па}, \quad (2)$$

де  $R$  – радіус валка, м;  $R_2$  – радіус валка з шаром тіста на ньому, м;  $\theta_0$  – початкове напруження зсуву;  $\beta$  – кут затягування.

Аналізуючи криву швидкості течії тіста (рис. 4), можна відзначити два параметри, що описують структурно-механічні властивості. Починаючи зі швидкості 1,3 рад/с і напруження зсуву 1,02 кПа, при густині 1180 кг/м<sup>3</sup> відбувається початок зміни параметрів. Починаючи зі швидкості 1,7 рад/с і напруження зсуву 3,92 кПа та густини 1170 кг/м<sup>3</sup>, течія тіста є рівномірною. Вона описує переміщення тіста між валками на ділянці нагнітання.

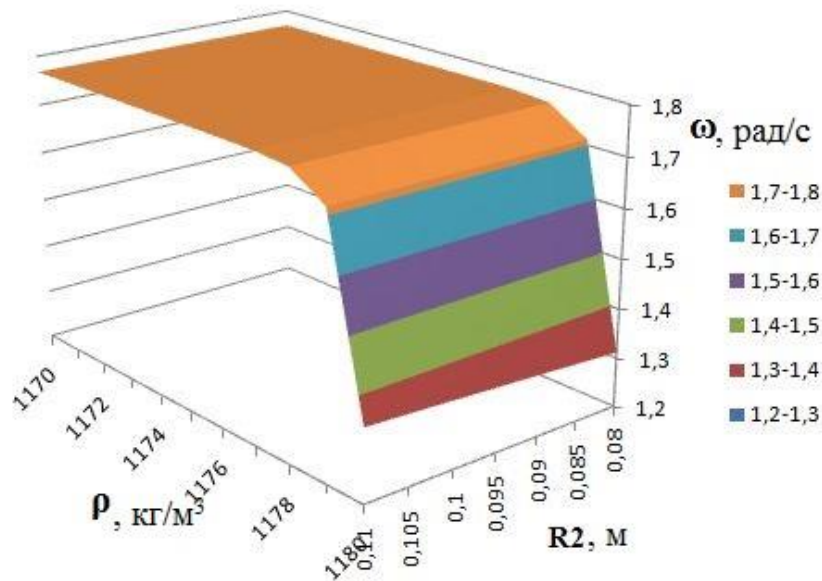


Рис. 4. Залежність критичної швидкості шару тіста на валку від густини тіста та радіуса валка з шаром тіста на ньому

Відзначено, що до важливих конструктивних параметрів валка відноситься вимога мінімізації витрат енергоресурсів та матеріалу на його виготовлення, дотримання температурних режимів усього процесу. При цьому очевидно, що мінімальним витратам матеріалу й температурних режимів тіста має відповідати мінімальна площа поверхні за інших рівних умов і при дотриманні заданої умови якісного нагнітання. Врахувавши корисну робочу площу валка, отримано очікуваний висновок про те, що поверхня валка пропорційна квадрату його розміру, а об'єм – кубу цього ж розміру у формі.

$$S_B/V_B = 1,5/d. \quad (3)$$

Запропоновано методику визначення оптимальних параметрів валкового нагнітання із центром маси завантаженого шматка тіста в бункер G. Така функція має вигляд.

$$J(Par, A, B) = e^{A(B-Par)^2}, \text{ кг/с.} \quad (4)$$

Її представлення у вигляді експотенціальної симетрії відносно точки аргументу (параметрів робочого процесу  $Par$ ), тобто такого, що  $J(Par)=G$ . Невідомі коефіцієнти в рівнянні (4)  $A$  та  $B$  визначено для кожного випадку

функції належності  $J$  методом найменших квадратів. Розв'язування рівняння проведено за основними конструктивними параметрами  $(h, R)$ , що впливають на ефективність останньої стадії процесу розкачування, які ґрунтуються трьома напрямками: 1 – вплив зазору між валками; 2 – дії параметрів радіус-вектора точки тіста відносно осі валків; 3 – вплив параметрів зазору  $h$  та радіус-вектора  $R$ . Для: 1 – залежність швидкості витрати тіста згідно з (4) має вигляд  $G(h)=e^{-0,95 \times (3,72-h)^2}$ ; 2 – витрата тіста від параметру  $R$  –  $GG(R)=0,99 \times e^{-0,032 \times (163,9-R)}$ ; 3 – мінімізація двох визначених функцій по двовимірній області двох факторів  $r$  та  $h$   $GG(h,R)=\min(GG(h), GG(R))$ .

Графік нечіткої функції витрати середовища по області зміни двох аргументів на площині  $(R, h)$  наведено на рис. 5.

Нижня та верхня межі графіка відповідають відповідно поверхневому та міжповерхневому руху середовища між валками. На основі запропонованих методик (3, 4) обґрунтовано функціональні залежності допустимого діаметра та зазору, який теоретично знаходиться в межах конструктивних параметрів: діаметр валків 155–165 мм; зазор 15–34 мм.

Одним із пріоритетних чинників розрахункової течії тіста є кут зтягування  $\beta$  (рис. 6), який залежить не тільки від кількості тіста, але й від конструктивного виконання валків. Також слід відзначити, що швидкість тіста по поверхні валка дозволяє оптимізувати конструктивно-кінематичні параметри й режими роботи робочих органів і формувальної машини загалом відповідно

$$v_0 = v_B (\cos \beta - f \sin \beta), \text{ м/с}, \quad (5)$$

де  $v_B$  – швидкість обертання валка, м/с;  $f$  – коефіцієнт тертя в'язко-пластичної маси;  $\beta$  – кут зтягування ( $30^\circ$ ).

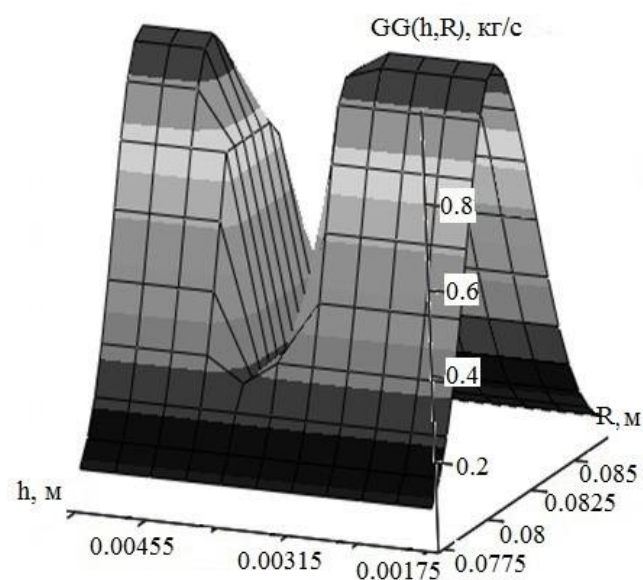


Рис. 5. Графік нечіткої функції витрати середовища

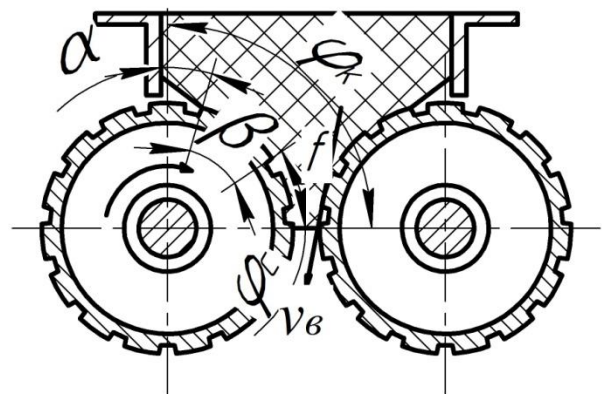


Рис. 6. Схема зміни кута контакту з тістом по поверхні валка

Отже, кут  $\beta$  зтягування буде змінюватися при переміщенні маси по поверхні валка. При збільшенні  $\beta$ , як бачимо з формули (5),  $v_0$  – зменшується.

За таких умов  $\beta = \varphi_k = \text{arc} * \text{tg} \frac{l}{f}$ , маса тіста не контактує з поверхнею валка. Таким чином,  $\varphi_k$  є максимально можливим кутом захоплення тіста, що залежить від напрямку переміщення його маси. В даному випадку довжина направляючої (контактної зони валка)  $L \leq \frac{\varphi_k}{180} \pi R$ , де  $R$  – радіус валка. Встановлено, що тривалість  $t_{\text{пр}}$  повороту тіста на заданий кут  $\varphi_k$  визначається рівнянням

$$t_{\text{пр}} = \frac{R}{v_{\text{в}} \sqrt{1+f^2}} \ln \frac{\text{tg} \left[ \frac{1}{2} (\varphi_k - \beta) \right]}{\text{tg} \left[ \frac{1}{2} (\alpha - \beta) \right]}, \text{ с}, \quad (6)$$

де  $\varphi_k$  – кут контакту тіста з валком;  $\beta$  – кут затягування;  $\alpha$  – кут між стінкою і початком затягування тіста валком.

Розв'язок рівняння дає можливість визначити час дії валків на тісто та запланувати шляхи досягнення надійності процесу нагнітання тіста:

– у кожен момент часу й у кожній точці простору в процесі взаємодії тіста з валками передбачити властивості й взаємодії, необхідні для отримання якісного результату;

– максимально сприяти дотриманню властивостей тіста при взаємодії з конструктивними елементами вузла нагнітання, усувати втрати й відходи;

– отримати якісний процес деформації за мінімальної витрати часу;

– комплексно підходити до реологічних зв'язків системи;

– керувати потоком тіста за допомогою конструктивних і технологічних параметрів.

Теоретичні й експериментальні дослідження дозволили розкрити зв'язки між конструктивними й технологічними елементами системи нагнітання, з'ясувати основні й допоміжні параметри, що можуть якісно і кількісно характеризувати роботу вузла нагнітання (табл. 1). У таблиці 1 наведено порівняльний механізм їхнього впливу на тісто, що розкриває основний принцип і механізм дії досліджуваного вузла нагнітання.

У четвертому розділі «**Зв'язок між геометричними параметрами валків, термодинамікою тіста та біологічними процесами в технології нагнітання**» наведено теоретичні й експериментальні дослідження визначення конструктивних і технологічних факторів, які впливають на фізико-механічні властивості тіста, утворення температурних потоків на основі термодинамічної моделі робочого процесу та реологічних зв'язків. Встановлено, що висхідна часткова в'язка циркуляції тіста розпочинається від зони затягування, стискування до зони розкачування за висоти шару газорідної фази від 0,2 до 0,4 м над обертовими валками. За таких умов у тісті газорідний потік підсилюється потенціалом подрібненого і розчиненого  $\text{CO}_2$  по висоті робочої камери.

Дослідження з використанням альвеографа встановили, що додаткова обробка тіста розкачувальними валками перед його завантаженням у робочу камеру та сама дія валкового вузла впливає на деформацією диспергованої фази. При дії змінних тисків (стискування середовища) покращуються

пружність та еластичність тіста, збільшуються витрати питомої енергії на його деформацію. Відповідно змінюються його структурно-механічні властивості, які залежать від кількості циклів нагнітання.

Таблиця 1

### Порівняльна характеристика параметрів вузла нагнітання формувальних машин

Параметр вузла нагнітання формувальної машини	Показник параметрів		
	Б4-58-68 р. випуску	БМ4-58-2015 р. випуску	БМ4-58У-2017 р. випуску
Порція одноразового завантажування тіста в бункер, кг	28	18	40
Середні втрати тіста при нагнітанні:	1,314	0,348	0,251
а) торцевої поверхні, кг	0,188	0,025	–
б) розкачувальної поверхні валка, кг	1,126	0,323	0,251
Тривалість дискретного циклу нагнітання, с	2,35	1,8	1,6
Кількість дискретних циклів на хв	15	19	21
Вага чотирьох напівфабрикатів, кг	0,038	0,039	0,041
Вага 10 шт. готових виробів, кг	0,065	0,067	0,072
Температура тіста:			
а) до нагнітання, °С	24,5	24,5	24,5
б) після нагнітання, °С	31,5	29,2	24,5
Температура поверхні валка, °С	28,7	28	24,5

Величини розтяжності й пружності перебувають у прямій залежності від контакту тіста, товщини й площі контакту його з валком, кількості циклів за період нагнітання маси тіста з робочої камери. Дослідженнями підтверджено висунуті передумови й оптимальну теоретично обґрунтовану залежність впливу деформації на якість тіста. Проведено порівняльну характеристику результатів взаємодії факторів, що визначають структурно-механічні властивості маси тіста під час його нагнітання протягом загального дискретного циклу.

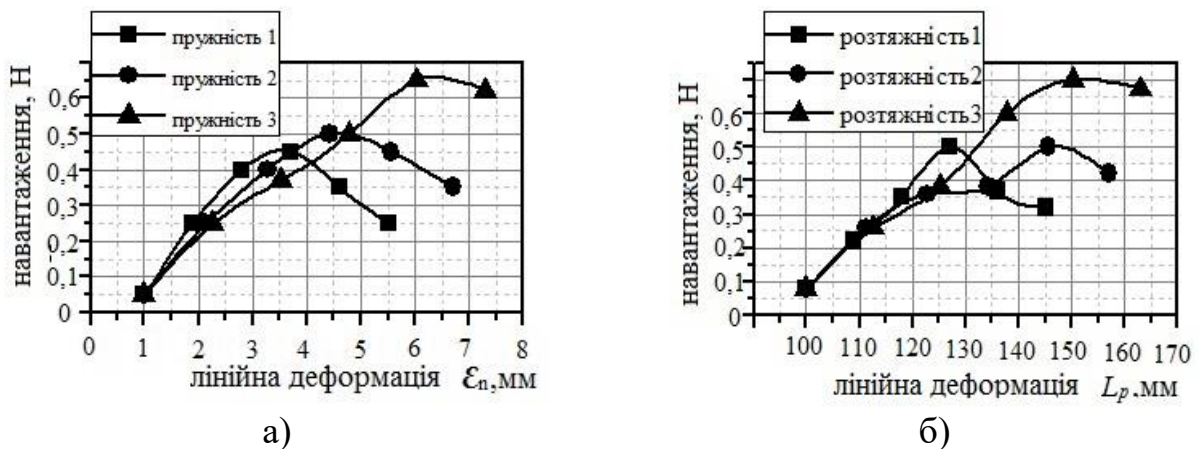


Рис. 7. Графіки деформації тіста з пшеничного борошна 1с після 1400 циклів обробки за 60 хв: а) – пружності  $E_n$  і б) – розтягування  $L_p$  від числа циклів обробки: 1 – валка з насічками; 2 – циліндричного валка з пазами; 3 – циліндрично-гвинтового валка

З рис. 7 бачимо, що геометричні й конструктивні параметри валка впливають на пружні властивості й розтягування тіста. При завантаженій робочій камері тістом масою 40 кг на валках з насічками спостерігаються найкращі показники до 540 циклу, тривалістю 35 хв. Після тривалості 35 хв відбувається структурна зміна тіста, а відповідно змінюються й структурно-механічні властивості. При роботі циліндричних валків з пазами уже на 30 хв, але 584 циклі деформації відбувається зміна структури. У свою чергу, при нагнітанні тіста циліндрично-гвинтовими валками структурно-механічні властивості тіста залишаються незмінними до 50 хв і 1008 циклу обробки. Лише після даного часу, вже в кінці роботи, починаються незначні зміни. Це пояснюється тим, що деформація тіста, при роботі нової конструкції валків не зазнає температурних впливів, тобто відсутній негативний вплив – тертя.

Для того, щоб не відбулося руйнування структури тіста при його нагнітанні 1 та 2 типами валків необхідно в робочій камері вузла нагнітання зменшити кількість тіста та циклів обробки.

Такий підхід дозволяє дотримувати якісне нагнітання тіста, але не дозволяє збільшити продуктивність машини та автоматизувати саме виробництво. В свою чергу, конструкція третього типу валків дозволила збільшити продуктивність машини й дає можливість автоматизації лінії.

Розглянуто теплофізичні властивості тіста (теплопровідність, теплоємність), які визначають характер і швидкість перебігу теплових процесів. Їх біологічний характер походження визначає характеристику дуже складних і здебільшого досить наближених процесів. Встановлено, що теплопровідність тіста залежить не тільки від його стану, а й від напрямку теплового потоку відносно дії валків, де цикл розповсюдження досить короткий і втрати тепла на випромінювання й конвекцію незначні (рис. 8). Тому припустимо, що бічні поверхні валка перебувають в адіабатичному граничному стані й що розподіл температури по площині, паралельній поверхні тертя, є рівномірним.

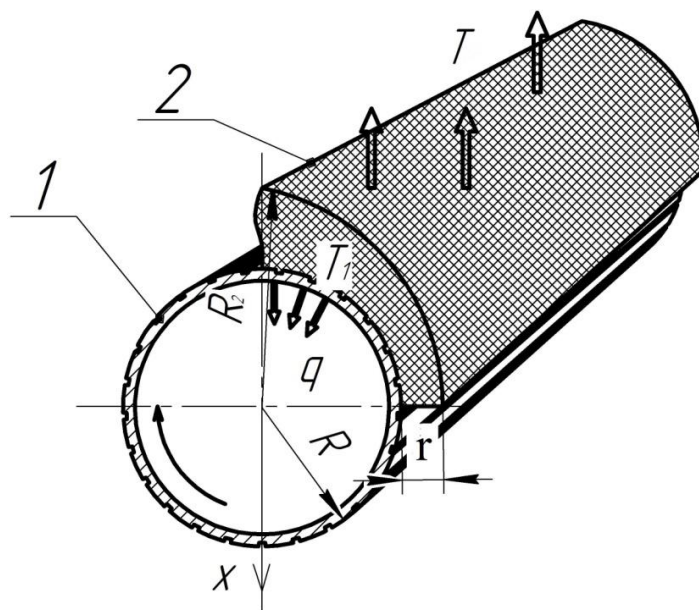


Рис. 8. Схема імпульсного фрикційного контакту: 1 – валок, мм; 2 – тісто;  $T$  – постійна температура;  $T_1$  – температура на поверхні фрикційного контакту

Таким чином, температура в цій площині апроксимується одним значенням у точці перетинання за одномірним аналізом методом кінцевих різниць. Умови розв'язування завдання містять рівняння теплопровідності у вигляді:  $\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} * \frac{\partial T}{\partial r} = 0$ . Провівши інтегрування, отримано загальний розв'язок рівняння, яке визначає розподіл температури по товщині  $r$  тіста при зтягуванні валками:

$$T(r) = 323,793 + 14,535 \ln r, \text{ } ^\circ\text{K}. \quad (7)$$

Знаючи розподіл температури по товщині  $r$  тіста, теплоємність середовища, його об'єм, визначено кількість теплоти, яка виділяється при нагнітанні для кожного з досліджуваних валків із урахуванням їх конструктивних і технологічних параметрів, підставивши їх у залежність

$$Q_T = c\rho 2\pi Rlr(T_1 - T), \text{ Дж}, \quad (8)$$

де  $Q_T$  – кількість теплоти валка, Дж;  $R$  – радіус валка, м;  $r$  – шар тіста на валку, м;  $T$  – температура тіста до обробки,  $^\circ\text{K}$ ;  $T_1$  – робоча температура тіста,  $^\circ\text{K}$ ;  $\rho$  – густина тіста,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $c$  – теплоємність тіста,  $\text{Дж}/\text{кг} * ^\circ\text{C}$ ;  $l$  – довжина валка, м.

З метою підтвердження дослідних даних і якісного оцінювання зміни температури тіста в процесі технології нагнітання було виконано тепловізійну зйомку за допомогою тепловізора FlukeTi25. Встановлено, що температура тіста відповідає режиму початкової стадії зтягування –  $24,5\text{ }^\circ\text{C}$  із завантажувального бункера, і є суттєво нижчим температурного оптимуму при стискуванні  $28,7\text{ }^\circ\text{C}$  та нагнітанні  $31,5\text{ }^\circ\text{C}$ . Поверхня валка існуючої конструкції після подавання тіста на формування залишається протягом певного часу нагрітою до  $26,2\text{ }^\circ\text{C}$ , а поверхня нового відповідає температурі навколишнього середовища –  $24,5\text{ }^\circ\text{C}$ .

У п'ятому розділі «Узагальнення досліджень конструктивних і режимних параметрів нового вузла нагнітання» проведено дослідження температурного поля тіста у вузлі нагнітання машини Б-4-58 з валками нової і старої конструкції на кондитерській фабриці ПАТ «ТерА» при виробництві бублика «Подільський», визначено його структуру та наведено шляхи ефективного використання валкових робочих органів. Також розраховано економічний ефект від упровадження нових валків.

Проведено дослідження температури за період виконання нагнітання тіста трьома конструкціями валків при заданих технологічних режимах (рис. 9).

Зміна температури тіста масою 40 кг, завантаженого в робочу камеру, для кожного вузла нагнітання має різні значення. Найбільші значення зміни температури відбуваються при роботі машини конструкції 1968 р. Тобто вона досить стрімко зростає до  $31,5\text{ }^\circ\text{C}$  за 15 хв процесу, а починаючи з 15 хв, зменшується на  $0,5\text{ }^\circ\text{C}$  до завершення усього циклу. Враховуючи конструктивні зміни машини 2015 р., температура тіста зростає до  $28\text{ }^\circ\text{C}$  на 12 хв процесу. Починаючи зі вказаного періоду, тісто поступово зменшує свої значення. Температура практично не змінюється протягом загального дискретного циклу на валках розробленої конструкції й вона лежить у діапазоні  $24\text{--}23\text{ }^\circ\text{C}$ .

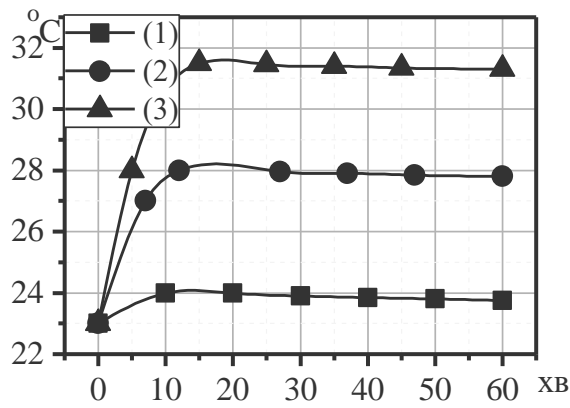


Рис. 9. Графік зміни температури в масі тіста за період її дискретного нагнітання: 1 – машини 2017 р. випуску; 2 – машини 2015 р.; 3 – машини 1968 р. випуску

Згідно з побудовою взаємодії поверхні валків з тістом (див. рис. 2) визначено параметр  $x$  (відстань від 0 до біжучої точки) та диференціал його зміни

$$x = \sqrt{\frac{(h - h_0)R}{2}}; \quad (9) \quad dx = \frac{\sqrt{2}}{4} * \sqrt{\frac{R}{h - h_0}}. \quad (10)$$

Відповідно момент на валах робочих органів на початку та в кінці дискретного циклу процесу нагнітання

$$M := \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot \frac{\mu}{\rho} \cdot \left(\frac{2n+1}{n+1}\right)^n \omega^n \cdot R^n \cdot L \int_{\varepsilon}^{hs} \frac{(h_1 - h) \cdot (|h_1 - h|)^{n-1}}{h^{2n+1}} \cdot \frac{R}{\sqrt{(h - h_0) \cdot R}} dh \quad (11)$$

$$MM := \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot \frac{\mu}{\rho} \cdot \left(\frac{2n+1}{n+1}\right)^n \omega^n \cdot R^n \cdot L \int_{-h_1}^{-\varepsilon} \frac{(h_1 - h) \cdot (|h_1 - h|)^{n-1}}{(|h|)^{2n+1}} \cdot \frac{R}{\sqrt{|h - h_0| \cdot R}} dh \quad (12)$$

Отримано графіки корисної потужності  $N_n(h, n)$  та питомого тиску  $P(h, n)$  на валки (рис. 10).

З даних графіків чітко бачимо, що при зростанні параметра  $h$  спочатку різко, а потім плавніше знижується потужність (затрачена на нагнітання) та питомий тиск.

Використовуючи засоби математичної статистики, по базі даних проведених результатів експерименту, методом найменших квадратів отримали параметри рівнянь кривих поліноміальної регресії. Рівняння спрямовані для моделювання залежностей  $N_n$  (кВт) та  $P$  (кПа) від індексу течії в межах  $0,1 \leq n \leq 0,8$ . Вони забезпечують необхідну точність наближень за відсутності розриву суцільного шару на виході між валками:

$$N_{n32}(n) = -0,07 + 1,1n - 3,8n^2 + 4,4n^3, \text{ кВт}; \quad (13)$$

$$N_{n22}(n) = 0,1 - 1,2n + 2,2n^2, \text{ кВт}; \quad (14)$$

$$P_{32}(n) = -0,06 + 0,9n - 3,1n^2 + 3,7n^3, \text{ кПа}; \quad (15)$$

$$P_{22}(n) = 0,1 - 1,0n + 1,8n^2, \text{ кПа}. \quad (16)$$

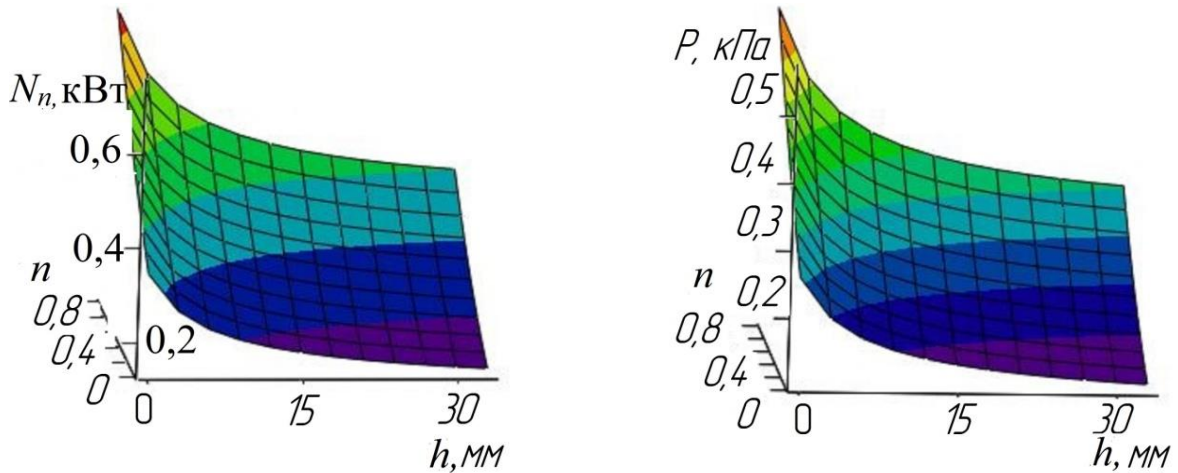


Рис. 10. Графіки поверхневих залежностей корисної потужності  $N_n$  та питомого тиску  $P$  на валок від параметра  $n$  та зазору  $h$

На основі дослідних даних і рівнянь побудовано графічні залежності (рис. 11).

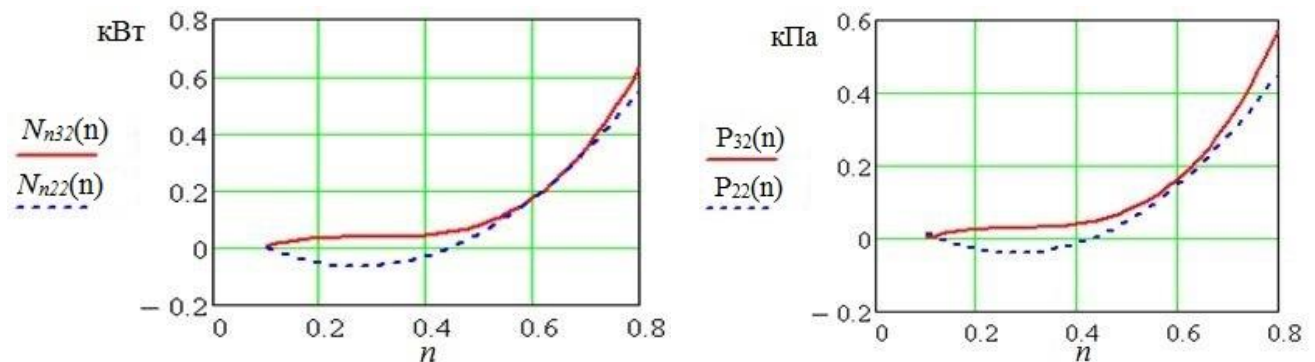


Рис. 11. Графіки залежностей корисної потужності  $N_n$  (кВт) та питомого тиску  $P$  (кПа) від зазору  $h=0,02$  м

Запропонований спосіб розрахунку дозволяє не тільки отримати питомий тиск, але й підібрати оптимальне значення зазору між валками, за якого величина перепаду тиску є постійною і дозволила дотриматися оптимальних параметрів споживання потужності при плавному стискуванні тіста.

До основних показників якості бубличних виробів можна віднести величину й структуру їх пористості. Опрацювання експериментальних даних дозволило встановити залежність між поверхнею пор та масою тістової заготовки – виробу, густиною, кислотністю. Залежність у першому наближенні має лінійний характер, який описано рівнянням

$$b = a_1 dm + a_2 i + a_3 X_T + a_4 \rho + a_5. \quad (17)$$

Для зразка, сформованого новим валком, є залежність

$$b = 1,104dm - 0,177i + X_T - 0,087\rho. \quad (18)$$

Для другого зразка, сформованого існуючим валком

$$b = 0,519dm + 8,422 * 10^{-3}i - 0,449X_T. \quad (19)$$

Розглядаючи процес утворення пор у динаміці формування виробу, встановлено, що їх товщина постійно змінюється за технологічний цикл. Утворення пор в основному проходить у таких напрямках:

- напруження від сил поверхневого натягу розділу фаз тісто – газ, що надають порі сферичну форму і зумовлюють тиск газу всередині;
- напруження за рахунок різниці питомої маси газу й тіста за законом Архімеда;
- напруження через постійне газоутворення та дію обминання на тісто.

З метою вивчення впливу технологічних і конструктивних параметрів на режим потоку тіста в робочій камері вузла нагнітання формувальної машини, проведено регресивний аналіз для отримання лінійної багатофакторної моделі величини продуктивності (рис. 12). Математичне опрацювання дослідних даних виконано з допомогою програми MathCad операторними методами найменших квадратів. Після розрахунків коефіцієнтів рівняння продуктивності набуло вигляду

$$Q_M = 1,314t + 8,647n + 0,78d - 4,22P, \text{ кг/год} \quad (20)$$

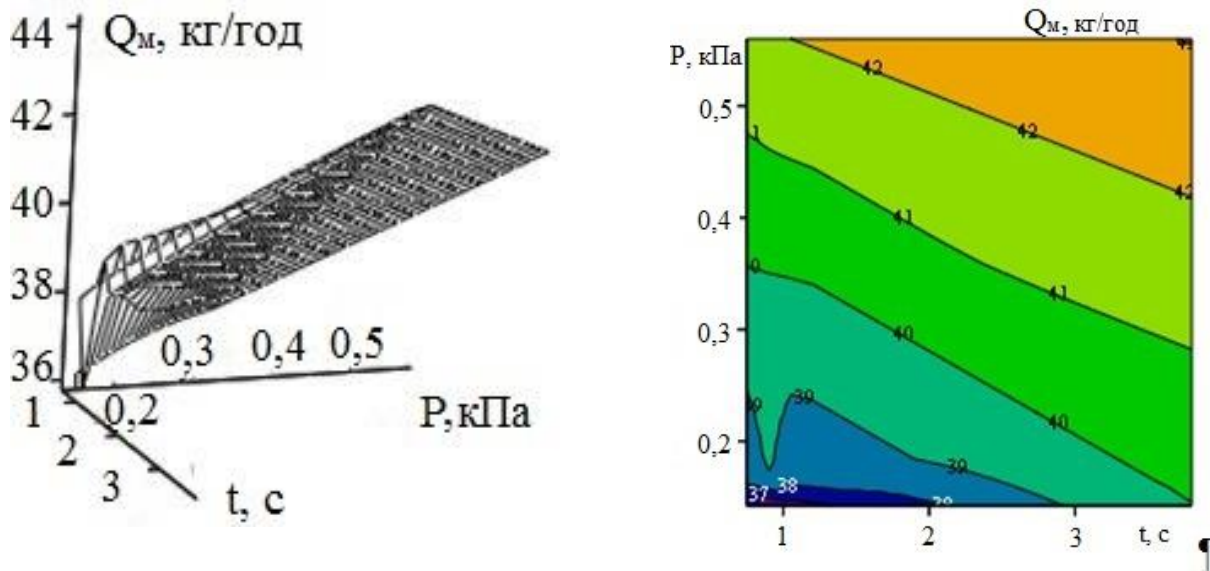


Рис. 12. Тривимірний графік продуктивності від стискування й часу процесу (а); лінії рівня (б)

Все це дозволяє оперативно здійснювати технічні заходи з підвищення надійності вузла нагнітання машини, скоротити час освоєння нових видів продукції, що, в свою чергу, забезпечує значний економічний ефект.

## ВИСНОВКИ

У дисертації на основі систематизації та узагальнення теоретичних і експериментальних досліджень, виконаних у лабораторних і виробничих умовах отримано нові важливі результати, які вирішують актуальне науково-практичне завдання з нагнітання тіста валками з забезпеченням якісних характеристик готової продукції та ефективної роботи формувальної машини.

1 Обґрунтовано основні конструктивні особливості робочих органів формувальних машин із валковими робочими органами для забезпечення необхідної їй стабільної форми і розмірів виробу. Дані реологічних показників оброблюваного тіста дають можливість раціонально виконати технологічний процес нагнітання із розкриттям фізичної суті формування тіста при дії валків.

2. Визначено вплив геометричних параметрів вузла нагнітання на структурно-механічні властивості середовища, біохімічний та масообмінний процеси й можливості стабілізації термодинамічних параметрів системи. Встановлено, що зміна структурно-механічних властивостей тіста визначається геометрією валка та дискретною стадійністю деформації, що становить єдиний процес формування напівфабрикату й готової продукції.

3. Встановлено шляхи зниження витрати на в'язке тертя тіста й намічено шляхи забезпечення стабільності процесу у вузлі подавання тіста формувальної машини, а саме: дотримання дискретності дії валків у діапазоні 1,5–2,4 с; зміна геометрії пазів, спрямованої на збільшення площі контакту з тістом; температура тіста не вище 35 °С; рівномірний розподіл тиску в масі тіста з дотриманням його значень  $P=0,5$  кПа; дотримання швидкості руху тіста  $0,2-0,35$  с<sup>-1</sup> за кута затягування  $\beta=30-35^\circ$ .

4. Запропоновано методики розрахунків та на їх основі проведено визначення: швидкості руху тіста згідно зі стадійністю деформації; часу контакту й кута затягування тіста; критичної швидкості, при якій настає пластична деформація. При збільшенні кута  $\beta$  швидкість руху тіста зменшується, а при напруженні зсуву 3,9 кПа і густині тіста 1170 кг/м<sup>3</sup> відбувається рівномірна течія.

5. Запропоновано уточнену реологічну модель течії тіста, яка адекватно характеризує поля деформації у вузлі нагнітання й забезпечує описування розподілу стадійності процесу.

6. Розглянуто теплофізичні властивості тіста, встановлено розподіл температури по його товщині при нагнітанні. Встановлено, що теплопровідність тіста залежить не тільки від його стану, а й від напрямку теплового потоку відносно дії валків. Зміна температури для валків 1968 р. випуску за 15 хв їх роботи змінюється на 6–7 °С, для валків 2015 р. – на 4–5 °С, а нової конструкції – залишається без змін, тобто становить 24,5 °С. Відповідно встановлено залежність показника течії  $n=0,4-0,8$  та зазору  $h=15-30$  мм на найменше споживання потужності та вплив тиску при нагнітанні.

7. Встановлено аналітичну залежність зв'язку геометричних параметрів валків з технологічними, наведено методику визначення оптимальних

параметрів, де їх діаметр повинен перебувати у визначених границях 155–165 мм, а зазор – 15–35 мм.

8. Визначено розподіл температури в масі тіста, проведено моделювання температурних режимів у ньому й на поверхні валка. Наведено порівняльну характеристику впливу конструктивних параметрів діючих і модернізованих вузлів нагнітання на органолептичні показники бублика «Подільський». Наведено методику визначення пористості готових бубликів і взаємозв'язок з технологічним процесом.

9. Експериментальні дослідження та обчислення процесу нагнітання дозволили виробити інженерно-технічні пропозиції щодо розроблення та удосконалення конструктивних особливостей вузла нагнітання. Економічний ефект від упровадження розробок і пропозицій щодо виконання дотримання валкового нагнітання тіста склав 87,3 тис. грн. Запропоновані розробки валків можна застосовувати не тільки для хлібобулочних і кондитерських виробів, але й в обробці інших в'язко-пластичних харчових мас.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Стадник І., Деркач А., Добротвор І. Моделювання корисної потужності валкової розкатки тіста в термінах реологічних параметрів. *Хранение и переработка зерна*. 2015. № 2 (191). С. 55–58. *(Здобувачем запропоновано методику розрахунку енергетичних параметрів розкачування тіста на тісторозкачувальній машині при врахуванні параметрів валків, режимів обробки, реологічних властивостей тіста, що дозволяє зменшити кількість споживання енергії, збільшити продуктивність, зменшити витрати сировини).*

2. Стадник І., Деркач А., Добротвор І. Визначення руху середовища при дії кута захвату валків. *Хранение и переработка зерна*. 2015. № 6–7 (194). С. 71–72. *(Здобувачем розглянуто процес течії реологічно складних систем між обертовими валками, які за характером розвитку деформації середовища відрізняються умовною деформацією і умовною роботою деформації, що визначає їхню поведінку в технологічних процесах).*

### Статті у наукових фахових виданнях України,

#### включених до міжнародних наукометричних баз даних:

3. Шевченко О. Ю., Ткачук Н. А., Стадник І. Я., Деркач А. В. Реологічний підхід до валкового нагнітання середовища. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. 2017. Т. 23. № 1. С. 118–125. *(Здобувачем розглянуто вплив інженерної реології на середовище та на її основі виведено аналітичну механічну модель для визначення оптимального значення деформації зсуву з метою забезпечення надійної роботи валкового нагнітального механізму).*

4. Лісовська Т. О., Деркач А. В., Стадник І. Я. Вивчення можливості використання екструдованого кукурудзяного борошна в технології борошняних кондитерських виробів оздоровчого призначення. *Наукові праці національного університету харчових технологій*. 2017. Т. 23. № 5. С. 108–115. *(Здобувачем*

доведено, що дієтичні властивості борошняних сумішей, зумовлені частково декстринізованим крохмалем, сприятимуть підвищенню харчової цінності готового бісквітного напівфабрикату та бубличних виробів).

5. **Деркач А.**, Стадник І., Сухенко В., Василів В. Методика визначення температурних потоків у зоні дії валкових робочих органів. Продовольча індустрія АПК. 2017. № 3. С. 19–23. *(Здобувачем виконано розрахунок поширення теплоти за радіусом валка при дії в'язкого тертя в процесі нагнітання на ділянці поперечного перерізу робочої камери).*

6. Лісовська Т., **Деркач А.**, Стадник І., Сухенко Ю., Василів В. Екструдоване кукурудзяне борошно для дієтичного харчування. Продовольча індустрія АПК. 2017. № 6. С. 40–43. *(Здобувачем обґрунтовано ефективність використання екструдованого кукурудзяного борошна у технології виготовлення дієтичного харчування, а саме пшенично-кукурудзяного напівфабрикату та бубличних виробів).*

#### **Стаття у науковому виданні іншої держави**

7. Stadnyk I., Vitenko T., Drozdziel P., **Derkach A.** Simulation of components mixing in order to determine rational parameters of working bodies. Advances in Science and Technology Research Journal. 2016. Vol. 10. № 31. P. 130–138. *(Здобувачем розроблено математичну модель залежності в'язкості тіста від конструктивних особливостей робочого органу і частоти його обертання).*

#### **Статті в інших наукових виданнях:**

8. Стадник І. Я., Добротвор І. Г., **Деркач А. М.**, Василів В. П. Методика і результати дослідження утворення пор в бублику «Подільському». Научные труды SWorld. 2015. № 2 (39). Т. 3. С. 9–16. *(Здобувачем запропоновано методику розрахунку структури готового виробу при використанні параметрів розкачування тіста на формувальній машині з врахуванням режимів обробки, реологічних властивостей).*

9. **Деркач А. П.**, Стадник І. Я., Василів В. П. Застосування експериментально-статистичного моделювання для дослідження параметрів надійності валкових машин. Научные труды SWorld. 2016. № 2 (2). Т. 3. С. 63–66. *(Здобувачем розглянуто існуючі методи впливу на надійність та довговічність машин з валковими робочими органами, а також обґрунтовано вплив параметрів обертання валків на режим потоку неньютонівської рідини в робочій камері формувальної машини).*

10. **Деркач А. В.**, Стадник І. Я., Василів В. П. Методика розрахунку енергетичних параметрів валкової тісторозкаточної машини. Научные труды SWorld. 2016. № 2 (2). Т. 3. С. 69–73. *(Здобувачем запропоновано методику розрахунку енергетичних параметрів валків, режимів обробки, реологічних властивостей тіста).*

11. Стадник І. Я., **Деркач А. В.** Обґрунтування побудови досконалості машин із валковими робочими органами. Хранение и переработка зерна. 2016. № 2 (199). С. 47–50. *(Здобувачем розглянуто різні можливості, напрями з*

виявлення і встановлення факторів, які визначають раціональність застосування способів і схем оформлення машин різних типів).

12. Стадник І., Деркач А., Василів В. Визначення потужності валкової тісторозкаточної машини. Знання. 2016. № 3–2. С. 36–41. *(Здобувачем запропоновано методу розрахунку потужності валкової тісторозкаточної машини з урахуванням основних параметрів робочих органів та оброблюваного середовища).*

13. Гаврилко П., Деркач А. В., Стадник І. Я. Обґрунтування параметрів, що відбуваються в робочих камерах машин з валковими робочими органами. Хранение и переработка зерна. 2017. № 2 (210). Т. 2. С. 34–38. *(Здобувачем представлено аналіз технології нагнітання тіста валками при сприянні впливу адгезії на процес течії у формувальній машині, обґрунтовано площу контакту та складові, формуючі роботу на подолання деформації тіста при визначенні основних залежностей, які впливають на процес, відповідно до кожного певного періоду стадії деформації).*

### **Патенти України на корисні моделі:**

14. Стадник І. Я., Деркач А. В., Стадник О. І. Патент України на корисну модель 111061 Україна. МПК (2006.01) А21С 3/10. Вузол подачі тіста формувальної машини. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. № 201605317; заявлено 16.05.16; опубліковано 25.10.16; Бюл. № 20. 4 с. *(Здобувачем запропоновано вузол подачі тіста формувальної машини з циліндрично-гвинтовими валками).*

15. Стадник І. Я., Деркач А. В. Патент України на корисну модель 111503 Україна. МПК (2006.01) А21С 3/10. Вузол подачі тіста формувальної машини. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. № 201605302; заявлено 16.05.16; опубліковано 10.11.16; Бюл. № 21. 4 с. *(Здобувачем запропоновано вузол подачі тіста формувальної машини з конічно-гвинтовими валками).*

16. Стадник І. Я., Стадник О. І., Деркач А. В. Патент України на корисну модель 113270 Україна. МПК (2006.01) А21С 3/10. Робочий орган вузла подачі тіста формувальної машини. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. № 201606529; заявлено 15.06.16; опубліковано 25.01.17; Бюл. № 2. 4 с. *(Здобувачем запропоновано робочий орган вузла подачі тіста формувальної машини).*

17. Стадник І. Я., Деркач А. В., Мамай О. В. Патент України на корисну модель 113434 Україна. МПК (2006.01) А21С 3/10. Робочий орган вузла подачі тіста формувальної машини. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. № 201608076; заявлено 21.07.16; опубліковано 25.01.17; Бюл. № 2. 4 с. *(Здобувачем запропоновано робочий орган вузла подачі тіста формувальної машини).*

### **Тези наукових доповідей:**

18. Стадник І., Деркач А. Напрямок розвитку нагнітальних валків. XVIII наукова конференція Тернопільського національного технічного

університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 29–30 жовтня 2014 року: тези доповіді. Тернопіль, 2014. С.190. *(Здобувачем розглянуто область застосування валкових робочих органів, розрахунок їх основних конструктивних параметрів та встановлено напрями розвитку).*

19. Деркач А. Оцінка валкового нагнітання тіста. Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання: VIII Всеукраїнська студентська науково-технічна конференція, м. Тернопіль, 23–24 квітня 2015 року: тези доповіді. Тернопіль, 2015. С. 23.

20. Стадник І., **Деркач А.** Оцінка валкового нагнітання тіста. Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті: 81 Міжнародна наукова конференція молодих учених, аспірантів і студентів, м. Київ, 23–24 квітня 2015 року: тези доповіді. К., 2015. С.176–177. *(Здобувачем обґрунтовано методику розрахунку робочих параметрів, що протікають в машинах з валковими робочими органами).*

21. **Деркач А.**, Стадник І. Дослідження валкового нагнітання тіста. Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій: Міжнародна науково-технічна конференція, присвячена 55-річчю заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та 170-річчю з дня народження Івана Пулюя, м. Тернопіль, 19–21 травня 2015 року: тези доповіді. Тернопіль, 2015. С. 215. *(Здобувачем встановлено залежність між геометричними параметрами робочого органу та технологічним процесом формування напівфабрикату).*

22. **Деркач А.**, Стадник І. Дослідження впливу валкового нагнітання на якість готової продукції. Стан і перспективи харчової науки та промисловості: Міжнародна науково-технічна конференція, м. Тернопіль, 8–9 жовтня 2015 року: тези доповіді. Тернопіль, 2015. С.27–28. *(Здобувачем проаналізовано взаємодії валкових робочих органів з оброблюваним середовищем та встановлено, що якість готової продукції залежить від конструктивних особливостей машини, а також якісних показників сировини і технологічного процесу виготовлення).*

23. **Деркач А. В.**, Стадник І. Я., Василів В. П. Аналіз конструктивних параметрів валків тісторозкаточних машин. Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства: VI Міжнародна науково-практична конференція вчених, аспірантів і студентів, м. Київ, 28 березня 2016 року: тези доповіді. К., 2016. С. 303–304. *(Здобувачем здійснено ґрунтовний аналіз конструктивних параметрів тісторозкаточних машин та їх вплив на процес розкачування тіста).*

24. Деркач А. Шляхи зменшення тертя обертових валків з робочим середовищем. Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання: IX Всеукраїнська студентська науково-технічна конференція, м. Тернопіль, 20–21 квітня 2016 року: тези доповіді. Тернопіль, 2016. С. 3.

25. **Деркач А В.**, Стадник І. Я. Рівняння реологічної моделі нагнітання тіста валками. XIX Наукова конференція Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 18–19 травня

2016 року: тези доповіді. Тернопіль, 2016. С. 207. *(Здобувачем розроблено рівняння реологічної моделі нагнітання тіста обертовими валками).*

26. Стадник І., **Деркач А.** Аналіз системних впливів на спрацювання валкових робочих органів. Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування: VII Міжнародна науково-практична конференція, м. Херсон, 22–23 вересня 2016 року: тези доповіді. Херсон, 2017. С. 206–207. *(Здобувачем проведено аналіз причин спрацювання валкових робочих органів та встановлено напрями їх усунення).*

27. **Деркач А.**, Стадник І. Методика визначення питомої поверхні нагнітальних валків. Актуальні задачі сучасних технологій: V Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів, м. Тернопіль, 17–18 листопада 2016 року: тези доповіді. Тернопіль, 2016. С. 185. *(Здобувачем розроблено методику визначення питомої поверхні валків, досліджено вплив зміни діаметра валка на питому його поверхню).*

28. **Деркач А. В.**, Стадник І. Я. Розрахунок силових параметрів нагнітання тіста. Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті: 83 Міжнародна наукова конференція молодих учених, аспірантів і студентів, м. Київ, 5–6 квітня 2017 року: тези доповіді. К., 2017. С. 182–183. *(Здобувачем на основі експериментальних досліджень приведено характеристику показників деформації шару тіста при його нагнітанні валками).*

29. **Деркач А. В.**, Стадник І. Я., Василів В. П. Сутність процесу нагнітання тіста валками. Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства: VII Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 28 квітня 2017 року: тези доповіді. К., 2017. С. 312. *(Здобувачем розкрито основну суть процесу нагнітання тіста валками в бубличній подільно-закаточній машині).*

30. Гіджеліцький В., **Деркач А.**, Стадник І. Обґрунтування параметрів машини на створення заданих градієнтів швидкостей з їх рівномірним розподілом. Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування: III Всеукраїнська науково-технічна конференція, м. Тернопіль, 8–9 червня 2017 року: тези доповіді. Тернопіль, 2017. С. 199–200. *(Здобувачем розглянуто вплив основних конструктивних параметрів валкового робочого органу формувальної машини на швидкість формування структури середовища на основі оптимальних параметрів замішування і встановлення продуктивності машин).*

31. **Деркач А.**, Стадник І., Лісовська Т. Вплив конструкції валка на закономірності процесу деформації. Стан і перспективи харчової науки та промисловості: IV Міжнародна науково-технічна конференція, м. Тернопіль, 11–12 жовтня 2017 року: тези доповіді. Тернопіль, 2017. С. 103. *(Здобувачем досліджено вплив конструктивних параметрів валкових робочих органів на закономірності деформації тіста).*

32. Лісовська Т., **Деркач А.**, Кушнірук Н., Стадник І. Вивчення екструдованого кукурудзяного борошна для створення борошняних кондитерських виробів оздоровчого призначення. Стан і перспективи харчової

науки та промисловості: IV Міжнародна науково-технічна конференція, м. Тернопіль, 11–12 жовтня 2017 року: тези доповіді. Тернопіль, 2017 С. 96. *(Здобувачем проведено порівняльний аналіз властивостей борошна та обґрунтовано ефективність використання екструдованого кукурудзяного борошна у технології бісквітного напівфабрикату та бубличних виробів).*

33. Лісовська Т. О., **Деркач А. В.**, Стадник І. Я. Моделювання системи замішувально-збивального процесу в технології бісквітного напівфабрикату. Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті Євроінтеграції: Міжнародна науково-технічна конференція, присвячена 40-вій річниці створення Проблемної науково-дослідної лабораторії Національного університету харчових технологій, м. Київ, 7–8 листопада 2017 року: тези доповіді. К., 2017. С. 17–18. *(Здобувачем представлено модель замішувально-збивального процесу при виробництві бісквітного напівфабрикату).*

34. **Деркач А. В.**, Стадник І. Я., Лісовська Т. О. Міжфазова взаємодія в тісті при дії обертових валків. Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті Євроінтеграції: Міжнародна науково-технічна конференція, присвячена 40-вій річниці створення Проблемної науково-дослідної лабораторії Національного університету харчових технологій, м. Київ, 7–8 листопада 2017 року: тези доповіді. К., 2017. С. 59–60. *(Здобувачем досліджено трансформацію енергії в процесі нагнітання та її вплив на структурні зміни в тісті).*

## АНОТАЦІЯ

**Деркач А. В. Підвищення ефективності нагнітання тіста обертовими валками у формувальній машині.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.18.12 «Процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв». Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2018.

Дисертацію присвячено обґрунтуванню конструктивних і технологічних параметрів при проектуванні нових валків вузла нагнітання для формування тіста заданої якості, форми та розмірів. Розроблено реологічну модель для розв'язування задач, пов'язаних з оцінюванням пружно-деформованого стану тіста у вузлі нагнітання. Встановлено критичну швидкість течії, за якою вперше настає пластична деформація. Розроблено і запропоновано методику визначення оптимальних параметрів валкового нагнітання. Встановлено, що одним із пріоритетних чинників розрахункової течії тіста є кут затягування  $\beta$ , який залежить від конструктивного виконання валків. Тривалість  $t$  повороту тіста на поверхні валка залежить від даного кута і становить 2,36–1,8 с. Здійснено математичне моделювання впливу зазору між валками та індексу течії на корисну потужність і питомий тиск. Розраховано моменти на валах у початковий і кінцевий моменти дискретного нагнітання тіста.

Проведено порівняльний аналіз впливу геометричних та кінематичних параметрів різних типів валків на якісні показники напівфабрикату й готової продукції. Одночасно відображено органолептичні показники бублика «Подільський» та розкрито його структуру згідно з розробленою методикою.

**Ключові слова:** тісто, теплообмін, валкові робочі органи, в'язке тертя, обробка, цикл.

## АННОТАЦІЯ

**Деркач А. В. Повышение эффективности нагнетания теста вращающимися валками в формовочной машине.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.18.12 «Процессы и оборудование пищевых, микробиологических и фармацевтических производств». Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины. Киев, 2018.

Диссертацию посвящено обоснованию конструктивных и технологических параметров при проектировании новых валков узла нагнетания для формирования теста заданного качества, формы и размеров. Разработано реологическую модель для решения задач, связанных с оценкой напряженно-деформированного состояния теста в узле нагнетания. Установлено критическую скорость течения, при которой впервые наступает пластическая деформация. Разработано и предложено методику определения оптимальных параметров валкового нагнетания. Установлено, что одним из приоритетных факторов расчетного течения теста является угол затягивания  $\beta$ , который зависит от конструктивного исполнения валков. Продолжительность  $t$  поворота теста на поверхности валка зависит от данного угла и составляет 2,36–1,8 с. Проведено математическое моделирование влияния зазора между валками и индекса течения на полезную мощность и удельное давление. Рассчитано моменты на валах в начальный и конечный моменты дискретного нагнетания теста.

Проведен сравнительный анализ влияния геометрических и кинематических параметров различных типов валков на качественные показатели полуфабриката и готовой продукции. Одновременно отражены органолептические показатели бублика «Подольский» и раскрыто его структуру согласно разработанной методики.

**Ключевые слова:** тесто, теплообмен, валковые рабочие органы, вязкое трение, обработка, цикл.

## ANNOTATION

**Derkach A. V. Improvement of the effectiveness of the dough injection by the running shaft in the forming machine.** – The Manuscript.

Dissertation with a view to obtaining the academic degree of Candidate of Sciences in the specialty 05.18.12 «Processes and Equipment of the Food, Microbiological and Pharmaceutical Production». National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Kyiv, 2018.

Dissertation is dedicated to the substantiation of structural and technological parameters when designing new shafts of the injection unit for forming a test of a specified quality, shape and size.

It has been performed the analytical review of influence of constructive parameters of shafts working bodies of different class of machines on a viscous fluid, behavior of the specified fluid. It has been examined methods of rolling and performed contrastive analysis of constructions. It has been revealed the main essence of the influence of the surface of shafts working bodies on the structural and mechanical properties of viscous fluid. It has been determined the prospects of the shafts working bodies using during injection, rolling, transportation and ways of their modernization and construction. Shafts working bodies have been classified by features in machines of different classes which determine in the result the course of the technological process.

It has been discovered the general plan for conducting theoretical and experimental investigation on the developed physical model of the injection unit. The subjects and materials of the research have been determined provided research methods of the structural and mechanical, rheological characteristics, quality indicators, as well as the experiment planning scheme and using of the mathematical and computer processing of experimental data.

It has been developed a rheological model for solving problems connected with the evaluation of the stress-strain state of the dough in the injection unit.

It has been discovered the work of the injection unit which characterized by the discretization of the process. It has been defined critical flow velocity whereby time plastic deformation occurs for the first. Thus, parameters start change when the speed comes up to 1.3 radian per second, the shearing stress comes up to 1.02 kPa g and the density comes up to 1180 kg per cubic meter. It has been developed and proposed a method for determining of the optimal shaft injection parameters.

To minimize the structural parameters it has been determined specific area of the shaft and influence of changes of its diameter on this area.

It has been defined that one of the priority factors of the dough calculated flow is the contact angle  $\beta$ , which depends on the structural performance of the shafts. Consequently, the duration  $t$  of the dough turning on the surface of the shaft depends on this angle and is 2.36–1.8 s.

Considering the different designs of injection units has been given their comparative characteristics in the forming machine, which are used on the enterprise.

The research confirms the advanced preconditions and the optimal, theoretically substantiated dependence of the influence of deformation on the quality of the dough.

It has been considered thermophysical properties of the dough (thermal conductivity, thermal capacity), which determine the nature and speed of the flow of thermal processes.

It was founded that the thermal conductivity of the dough depends not only on its condition, but also on the direction of the heat flow with regard to the action of the shafts. On the basis of Fourier's law has been developed a mathematical model for determining the temperature fluxes in the dough flow. On the basis of data about the

temperature distribution in the dough thickness, thermal capacity of the area, its volume, with using the mathematical model has been defined amount of heat which generated during injection for each of the investigated shafts with taking into account their structural and technological parameters.

It has been performed the thermal-imaging shooting by means of the FlukeTi25 thermal imager in order to confirm the theoretical calculations and a qualitative assessment of the dough temperature change during the technological process of injection. Such temperature change of the dough with the mass of 40 kg loaded into the working camera has different values for each injection unit. The greatest values of temperature change occurs in the unit of the machine which was constructed in the year 1968, in other words temperature increase very rapidly to the 31,5 °C for 15 minutes of the process, and beginning from the 15<sup>th</sup> minute it decreases by 0,5 °C until the completion of overall cycle time. If take into account constructive changes of the machine of the year 2015, dough has the increasing of temperature to the 28 °C on the 12 minutes of the process. The dough gradually reduces its values to the completion of the overall discrete cycle with the beginning of the specified period. The value of the temperature practically does not change during the process on the shafts of the developed construction and they keep in the range of 24–23 °C.

It has been performed a mathematical simulation of the influence of the gap between shafts and the flow index on the net power and specific pressure. It has been calculated moments on shafts in the initial and final moment of the discrete injection of the dough. On the basis of the research data of equations was constructed graphic dependencies and performed analysis of the polynomial regression curves.

It has been found the relationship between the parameters of the new shafts and the productivity of injection unit of the dough.

It has been performed comparative analysis of the effect of geometric and kinematic parameters of different types of shafts on the qualitative indicator of semi-finished products and finished products. At the same time, the organoleptic parameters of «Podilskyi» doughnut-shaped bread roll was indicated and was discovered its structure in accordance with the developed methodology.

It has been defined that the process of the dough injection can be controlled by means of providing the temperature stability; increasing of thermal exchange surface; production of a shaft from a material which has the maximum thermal conductivity; increasing of the thermal losses in the environment (the return of heat to a shaft surface which does not contact with the dough).

The effectiveness of the introduction of cylindrical-screw shafts is confirmed by the act of introduction into production with an annual economic effect of 87.3 thousand UAH. This construction of the shafts working bodies is protected by the patent of Ukraine on the utility model.

**Key words:** dough, heat transfer, shafts working bodies, viscous friction, treatment, cycle.