

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-64>  
УДК 664.6:532.13

**ФЕДОРІВ ВІКТОР**

Хмельницький національний університет  
<https://orcid.org/0000-0002-4499-0910>  
e-mail: [fedoriv55@ukr.net](mailto:fedoriv55@ukr.net)

**МАРТИНЮК АНДРІЙ**

Хмельницький національний університет  
<https://orcid.org/0000-0001-8277-1308>  
e-mail: [avmart@khmnu.edu.ua](mailto:avmart@khmnu.edu.ua)

**СТЕЧИШИН МИРОСЛАВ**

Хмельницький національний університет  
<https://orcid.org/0000-0001-5780-2790>  
e-mail: [miro011951@gmail.com](mailto:miro011951@gmail.com)

**КУРСКОЙ ВОЛОДИМИР**

<https://orcid.org/0000-0002-3929-884X>  
e-mail: [kurskoiv@khmnu.edu.ua](mailto:kurskoiv@khmnu.edu.ua)

## НАУКОВО ОБҐРУНТОВАНЕ ПРОЄКТУВАННЯ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ФОРМУВАЛЬНОГО УСТАТКУВАННЯ ХАРЧОВИХ ПІДПРИЄМСТВ НА ОСНОВІ МЕТОДІВ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ ГІДРОТЕРМОДИНАМІКИ

У роботі наведено науково обґрунтовані методи проектування робочих органів формувального обладнання для харчової промисловості на основі аналізу структурно-технологічних характеристик тіста. Об'єктом вивчення стала реологічна поведінка та процес структуроутворення бубличного тіста під час циклічно-неперервного валкового нагнітання. Для визначення взаємозв'язків між тиском стиснення, ефективною в'язкістю та градієнтом швидкості зсуву застосовано методи термо-гідродинамічного аналізу та реометрії.

Теоретично і експериментально встановлено, що зміна допустимого напруження зсуву залежить від швидкості руху тіста по поверхні валка і товщини шару стиснення. З'ясовано, що інтенсивна механічна обробка протягом 3 секунд призводить до рівномірного зниження напруження зсуву до 300 Па, що пов'язано з перерозподілом вологи та зміною стану колоїдів. Отримані кількісні дані щодо рівня стиснення тіста при різних технологічних зазорах можуть бути інтегровані в CFD-моделі для прогнозування якості кінцевої продукції. Практична значущість роботи полягає у можливості скорочення технологічного циклу та збільшенні питомого об'єму виробів на 22% за рахунок оптимізації конструктивних параметрів нагнітального вузла.

**Ключові слова:** інноваційне устаткування, валковий нагнітач, обчислювальна гідродинаміка, реологічні властивості тіста, ефективна в'язкість, напруження зсуву, модуль стиснення, структура потоку, газоутримна здатність, питомий об'єм.

FEDORIV VIKTOR, MARTYNYUK ANDRII, STECHYSHYN MYROSLAV, KURSKOI VOLODYMYR  
Khmelnitskyi National University

## SCIENTIFIC DESIGN OF WORKING BODIES OF FORMING EQUIPMENT OF FOOD ENTERPRISES BASED ON METHODS OF COLUMN HYDROTHERMODYNAMICS

The paper presents scientifically substantiated approaches to the design of working bodies of forming equipment for the food industry, based on a comprehensive analysis of the structural and technological characteristics of dough systems. The relevance of the study is обусловлена the need to intensify forming operations while maintaining stable rheological properties of dough and ensuring high and reproducible quality of finished products. The object of the research was the rheological behavior and structure formation of bagel dough under conditions of cyclic-continuous roller injection, which combines periodic compression with continuous material transport. To establish quantitative relationships between compression pressure, effective viscosity, and shear rate gradient, methods of thermo-hydrodynamic analysis were applied in combination with experimental rheometry. The dough was considered as a complex viscoplastic dispersed system whose properties change under short-term intensive mechanical action. Theoretical modeling was supported by experimental determination of shear stress and viscosity at various roller speeds and technological gaps. It was theoretically and experimentally confirmed that the allowable shear stress is a nonlinear function of the dough movement velocity along the roller surface and the thickness of the compressed layer. An increase in roller speed and a decrease in the compression gap intensify shear deformation, which leads to partial structural breakdown followed by stabilization of the dough matrix. It was established that intensive mechanical processing for 3 seconds results in a uniform reduction of shear stress to approximately 300 Pa. This effect is associated with moisture redistribution within the dough, relaxation of the gluten network, and changes in the state of colloidal components, which together promote more homogeneous structure formation. The obtained quantitative data on dough compression levels at different technological gaps can be directly integrated into CFD models for predictive simulation of forming processes and final product quality. The practical significance of the research lies in the possibility of optimizing the design and operating parameters of the injection unit, which allows a reduction of the technological cycle duration and an increase in the specific volume of finished products by up to 22%, while ensuring stable forming and improved consumer properties.

**Key words:** innovative equipment, roller pump, computational fluid dynamics (CFD), rheological properties of dough, effective viscosity, shear stress, compression modulus, flow structure, gas-retaining capacity, specific volume.

Стаття надійшла до редакції / Received 18.01.2026  
Прийнята до друку / Accepted 11.02.2026  
Опубліковано / Published 26.03.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Федорів Віктор, Мартинюк Андрій, Стечишин Мирослав, Курської Володимир

### Постановка задачі

Сучасний стан харчової промисловості відзначається зростаючими вимогами до енергоефективності виробничих процесів і стабільності високої якості кінцевої продукції. Особливої уваги потребує один із

ключових етапів у виробництві борошняних напівфабрикатів - процес нагнітання та формування тіста, який супроводжується складними механічними, фізико-хімічними та структурними перетвореннями матеріалу. Традиційні підходи до проектування вузлів нагнітання зазвичай спираються на спрощені інженерні розрахунки, які не враховують складну реологічну природу тіста як нелінійного в'язко-пружного середовища, яке містить газову фазу та має складну структуру. Такий підхід часто призводить до недостатньої точності моделювання процесів і зниження ефективності виробництва в цілому [1].

Подальший розвиток і вдосконалення формульовального обладнання, зокрема валкових нагнітачів, можливий лише за умови отримання нових глибоких знань про динаміку структуро-утворювальних процесів безпосередньо в робочій зоні устаткування. Актуальність цієї задачі зумовлена необхідністю відходу від традиційних емпіричних методів на користь цифрового проектування, що базується на комплексному аналізі фізичних і технологічних параметрів. Інтеграція сучасних методів обчислювальної термогідродинаміки (CFD) у розробку інноваційного устаткування відкриває нові можливості для візуалізації внутрішніх потоків тіста, виявлення зон застою або перегріву матеріалу, а також оцінки ступеня деформації білкового каркасу на ранніх етапах проектування. Це дозволяє не тільки підвищити якість продукції, але й оптимізувати конструктивні параметри устаткування для зменшення втрат і підвищення продуктивності.

Зв'язок із практичними виробничими завданнями обумовлений зростаючою потребою харчової галузі у впровадженні автоматизованих систем контролю якості та оперативного управління технологічними параметрами. Оскільки структурні властивості тіста при сталій конфігурації нагнітання відображають безпосередню динаміку технологічного процесу, точне та швидке регулювання технологічних параметрів стає ключовим фактором для забезпечення стабільної пористості, однорідності структури і питомого об'єму борошняних виробів, зокрема бубличних. Успішне вирішення цього завдання сприяє не лише покращенню споживчих характеристик продукції, таких як текстура та смак, а й суттєвому зниженню виробничих витрат завдяки зменшенню кількості браку та втрат сировини під час формування. Таким чином, комплексний підхід до проектування та управління процесом нагнітання тіста має значний потенціал для підвищення ефективності та конкурентоспроможності харчових підприємств.

#### Аналіз досліджень та публікацій

Проблематика вивчення структурно-механічних властивостей харчових мас та зміни їх властивостей під впливом механічних факторів широко розглянута в працях численних науковців. Фундаментальні положення реології тіста як структурованої дисперсної системи були викладені у роботах В.А. Піддубного [2], де визначено основні закономірності течії в'язко-пластичних матеріалів та запропоновано методики оцінки їх стисливості на основі класичних моделей об'ємної деформації. Водночас, для застосування цих моделей у контексті сучасних високошвидкісних валкових вузлів необхідне їх подальше уточнення з урахуванням інтенсивності деформацій, що додатково обґрунтовано в дослідженнях І.Я. Стадника [1].

Процес нагнітання, який виступає одним із ключових етапів формування харчових напівфабрикатів, був детально вивчений у роботах І.Я. Стадника, В.А. Піддубного та інших авторів [1, 2 - 13]. Автори системно проаналізували особливості реологічної поведінки тіста в умовах валкового нагнітання, встановлено, що зміни реологічних властивостей на різних стадіях цього процесу безпосередньо впливають на якість кінцевого продукту. Зокрема, динамічний характер зміни параметрів в'язкості та пружності тіста дає змогу здійснювати оперативне регулювання технологічних параметрів, що є важливим для підтримки стабільності якісних показників напівфабрикатів.

У дослідженнях Н.В. Філімонової та О.І. Некоза [6, 11] акцентується особлива роль білкового (клейковинного) каркаса як структурного елемента, який визначає механічну поведінку тіста при його деформації під час затягування валками. Виявлено, що під час цього процесу виникають значні деформації зсуву, які спричиняють перебудову внутрішньої структури клейковини, що, у свою чергу, визначає формування мікроструктури та пористості готового виробу. Зміни у поведінці білкового каркаса безпосередньо корелюють з кінцевими показниками текстури, міцності та об'єму борошняних виробів, що підтверджує необхідність врахування цих факторів при оптимізації технологічних режимів нагнітання.

Таким чином, інтеграція результатів цих досліджень дозволяє більш точно моделювати процеси формування тіста, що сприяє підвищенню ефективності виробництва та якості продукції харчової промисловості. Використання отриманих знань є основою для розробки новітніх технологічних рішень та вдосконалення конструктивних параметрів формульовального устаткування, що забезпечує конкурентоспроможність продукції на ринку.

Проблема інтеграції реологічних характеристик у цифрові моделі (CFD) частково висвітлювалася в дослідженнях, присвячених контролю параметрів вологості та в'язкості, зокрема у роботах Н.Ф. Прокопенка [4], що створює основу для автоматизації технологічних процесів. Водночас аналіз сучасних вітчизняних та зарубіжних видань [5, 10, 14, 15] свідчить про недостатню вивченість функціональної залежності зміни об'єму тіста від тиску стискання  $V = f(p)$  під впливом валкового нагнітання, особливо у випадках виробництва крутих видів тіста, характерних для бубличних виробів.

Слід також відзначити дослідження В.В. Бондаренка та Л.І. Каретнікова [3], які запропонували аналітичні залежності для оцінки рівня стискання тіста. Проте запропонована модель потребує додаткової верифікації щодо застосування для інноваційних валків із профільованою поверхнею, що широко використовуються в сучасних автоматизованих виробничих лініях харчових виробництв. Враховуючи це, існує

обґрунтована потреба в більш глибокому дослідженні динаміки процесу структуроутворення тіста під час циклічно-неперервного нагнітання із застосуванням методів обчислювальної гідродинаміки.

Особливу увагу заслуговують останні дослідження М.С. Стечишина [16, 17], у яких представлено результати проектування експлуатаційних параметрів змішувального та нагнітального обладнання. У цих роботах визначено критичні рівні деформації тіста, що дає змогу оптимізувати енергетичні витрати при збереженні структурної цілісності напівфабрикатів.

### Формулювання цілей статті

**Метою роботи є:** комплексне дослідження структурно-технологічних властивостей бубличного тіста в умовах інтенсивної деформації для створення наукової бази проектування інноваційного нагнітального устаткування.

Для досягнення поставленої мети було визначено такі основні **завдання**:

1. Експериментально встановити характер зміни реологічних параметрів (допускового напруження зсуву та ефективної в'язкості) тіста на різних стадіях валкового нагнітання.
2. Визначити кількісну залежність рівня стискання тістової маси від величини технологічного зазору між валками та кратності обробки.
3. Дослідити динаміку зміни об'єму газової фази тіста під впливом тиску та її роль у формуванні капілярно-пористої структури готового виробу.
4. Обґрунтувати можливість використання отриманих реологічних констант як вхідних параметрів для методів обчислювальної термогідродинаміки (CFD) з метою оптимізації геометрії робочих органів валкових машин.

### Виклад основного матеріалу

Виробництво борошняних напівфабрикатів, зокрема бубличної продукції, ґрунтується на обробленні тіста з пониженим вмістом вологи та підвищеною в'язкістю. Таке тісто являє собою складну структуровану дисперсну систему, сформовану твердою (борошно), рідкою та газовою фазами. Під час нагнітання валковими робочими органами система зазнає значних механічних навантажень, що зумовлює зміну її реологічних характеристик.

Трансформація реологічних властивостей тіста та формування його структури в умовах деформації є визначальним чинником при обґрунтуванні конструктивно-технологічних параметрів валкового вузла. Аналіз процесу деформування створює можливість оперативного коригування структурно-механічних показників напівфабрикату.

Рух тістової маси вздовж поверхні валка супроводжується неперервною зміною граничних напружень зсуву. Для оцінювання їх значень у робочій зоні нагнітання застосовано теоретико-експериментальну залежність:

$$\tau = k \cdot \frac{P}{h^2} \quad (1)$$

де  $k$  – константа, що визначається кутом затягування маси тіста поверхнею валка (при  $\alpha = 60^\circ$  значення  $k = 0,214$ );  $P$  – тиск нагнітання, Па;  $h$  – товщина шару тіста в зазорі між валками, м.

Наведена залежність дає змогу обґрунтувати кінетичні особливості циклічно-неперервного процесу нагнітання. На початковому етапі (0,4 - 1,0 с) напруження зсуву досягає пікових значень, що зумовлено значним опором былкового каркаса тіста. У ході подальшої механічної дії (до 3 с) величина  $\tau$  поступово та рівномірно зменшується і стабілізується на рівні близько 300 Па. Таке зниження пояснюється перерозподілом вологи в тістовій системі внаслідок набухання колоїдних компонентів борошна.

З огляду на те, що конструктивно-кінематичні параметри вузла нагнітання є близькими до параметрів ротаційного віскозиметра, швидкість зсуву  $D$  визначали за співвідношенням:

$$D = \frac{2\omega R_1^2 R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \quad (2)$$

де  $\omega$  – кутова швидкість обертання валка, рад/с;  $R_1$  – радіус валка (початок шару тіста), м;  $R_2$  – радіус зовнішньої межі шару тіста, м.

Експериментальні дані свідчать про різку зміну ефективної в'язкості  $\mu_{ef}$  у діапазоні малих допускових напружень. Це підтверджує перехід дискретних шматків тіста у стан суцільної в'язкої течії. Оптимальні показники процесу спостерігаються при  $\tau = 9,8 \cdot 10^5$  Па та в'язкості  $\mu = 1,3 \cdot 10^5$  Па·с.

Для оцінки інтенсивності механічної обробки використано показник рівня стискання  $\epsilon_h$ , запропонований В.В. Бондаренком та Л.І. Каретніковим:

$$\epsilon_h = \ln \frac{\delta_{зп}}{\delta_{то}} + \sum_{i=1}^n \ln \frac{\delta_{ті}}{\delta_{зі}} \quad (3)$$

де  $\delta_{зп}$  – величина зазорів між валками відповідно до кратності проходження процесу;  $\delta_{то}$  – початкова товщина маси;  $\delta_{ті}$  – товщина маси на виході.

У таблиці 1 наведено результати розрахунку рівня стискання для різних технологічних режимів.

Одним із найважливіших аспектів проектування інноваційного устаткування є врахування властивості стисливості тіста. Для опису цього процесу використано реологічне рівняння стану для стисливих середовищ [2, 10], що дозволяє встановити нарощування об'єму  $\Delta V$  через показник тиску:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = - \frac{P}{\epsilon_h} \quad (4)$$

де  $\epsilon_h$  – експериментально визначений нами показник рівня стиснення, який інтегрує в собі опір газової та твердої фаз напівфабрикату.

Значення рівня стискання тістової маси при різних зазорах

Параметри дослідження	Режим А	Режим Б	Режим В
Зазор між валками $\delta$ , мм	20	25	30
Рівень стискання $\epsilon_n$	-3,329	-2,858	-2,198
Характер впливу на структуру	Максимальне ущільнення	Помірне структурування	Оптимальне збереження газової фази

Аналіз отриманих залежностей (рис. 1) свідчить про адекватність запропонованої математичної моделі щодо опису поведінки бубличного тіста в міжвалковому зазорі. Зокрема встановлено, що за величини зазору 30 мм крива зміни об'єму розташовується вище порівняно з зазором 20 мм, що вказує на менший ступінь стиснення тістової маси та створює передумови для зниження енергетичних витрат за умови збереження її структури.

Структуроутворена дисперсна система, сформована борошном, рідкою та газовою фазами, під впливом валкових робочих органів перебуває в стані безперервної трансформації своїх структурних характеристик. Подальша еволюція показників стану тіста в умовах деформації тісно пов'язана з інтенсивністю перебігу ферментативних процесів. Установлено, що механічна енергія, передана тісту через робочі поверхні валків, частково витрачається на деструкцію білкових компонентів клейковини.

Наслідком цього є зниження механічної міцності клейковинного каркаса, що зумовлює зміну в'язкісних, пластичних і адгезійних властивостей тіста. Перебіг ферментативних процесів під час валкового нагнітання однозначно визначається характером деформацій. За високих швидкостей обробки, коли оптимальний час контакту є мінімальним, вплив ферментативного розрідження практично не проявляється, що призводить до формування щільного, так званого «крутого» тіста з підвищеними значеннями ефективної в'язкості.

Зменшення інтенсивності деформацій, навпаки, сприяє розвитку капілярно-пористої структури тістової маси. Завдяки стабільному зв'язку між допустимим напруженням зсуву  $\tau$  та вологістю тіста з'являється можливість прогнозування виходу готової продукції та енергетичних витрат на процес її формування.

Одним із ключових ефектів валкової обробки є перерозподіл та подрібнення газової фази. На початковій стадії нагнітання газова фаза представлена великими бульбашками повітря, що потрапили в тісто під час замісу. Проте під дією циклічного тиску в діапазоні  $P = 3,5 \cdot 10^5 - 5,0 \cdot 10^5$  Па відбувається одночасне стискання газових бульбашок та деформація структурної сітки біополімерів.

Інтенсивне подрібнення газових включень відбувається протягом усього циклу нагнітання тіста. Формування більш однорідної та дрібнодисперсної газової фази забезпечує підвищення газоутримної здатності тістової системи та стабілізацію її внутрішньої структури. Багаторазове, рівномірне та відносно м'яке стискання шару тіста в міжвалковому просторі додатково сприяє активному насиченню його киснем повітря, що, у свою чергу, інтенсифікує перебіг окислювально-відновних процесів у клейковинному каркасі.

Сукупна дія зазначених чинників, а саме підвищення ступеня аерації тіста та збільшення кількості мікропор на одиницю площі, зумовлює формування більш світлого та рівномірного м'якуша бубличних виробів на стадії формування напівфабрикату.

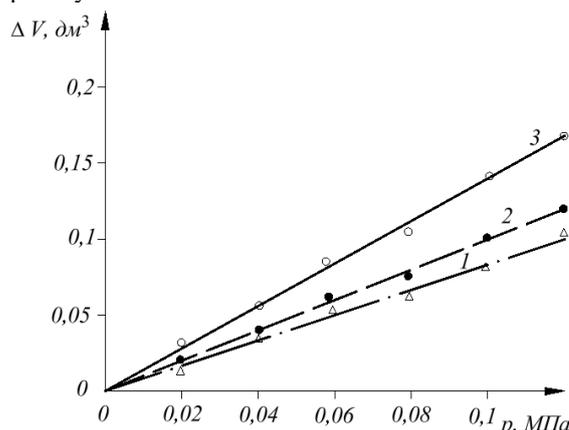


Рис. 1. Залежність зміни об'єму від тиску при різних значеннях величини зазору: 1) 20 мм; 2) 25 мм; 3) 30 мм

Аналіз динаміки зміни модуля об'ємного стискування засвідчив, що в області пружних деформацій його значення не є сталим і зазнає безперервних змін. Зі зростанням прикладеного тиску спостерігається тенденція до зменшення цього показника з поступовим наближенням до характеристик рідкої фази, зокрема води. Така поведінка свідчить про швидку трансформацію стану рідких компонентів тістової маси, яка відбувається без суттєвого підвищення температури. Це має принципове значення для забезпечення сприятливих умов збереження ферментативної активності та життєздатності дріжджових культур.

Дослідження крутного моменту при різних зазорах  $\delta = 20, 25, 30$  мм дозволило встановити, що збільшення зазору до 30 мм дозволяє значно скоротити тривалість процесу та знизити енерговитрати. У таблиці 2 наведено порівняльну характеристику якісних показників готових виробів залежно від рівня стискання тіста.

Вплив рівня стискування на якісні показники бубличних виробів

Показник якості готової продукції	Одиниця виміру	Традиційна технологія (контроль)	Валкове нагнітання ( $\epsilon_h = -2,198$ )	Відхилення від контролю, %
Питомий об'єм	см <sup>3</sup> /г	1,85	2,26	+22,1
Пористість	%	68	71	+4,4
Коефіцієнт набухання	од.	2,1	2,5	+19,0

Аналіз даних таблиці 2 дозволяє констатувати суттєве покращення споживчих властивостей готових виробів при застосуванні запропонованих наукових підходів:

Збільшення питомого об'єму на 22,1% безпосередньо пов'язане із встановленою динамікою подрібнення газової фази. Рівномірний розподіл мікробулбашок газу в структурі тіста при  $\epsilon_h = -2,198$  створює розвинену капілярну сітку, що забезпечує інтенсивне розширення напівфабрикату під час випікання.

Зростання коефіцієнта набухання на 19 % вказує на суттєві якісні перетворення у стані білково-полісахаридного комплексу тіста. М'яка, рівномірна деформація в міжвалковому просторі забезпечує більш повну гідратацію клейковинних білків і сприяє формуванню еластичного структурного каркаса, здатного ефективніше акумулювати та утримувати як вологу, так і газову фазу.

Покращення пористості підтверджує ефективність обраного тиску нагнітання  $3,5 \cdot 10^5$  Па, який є достатнім для структурування, але не призводить до механічного переущільнення та «загартування» тіста.

Дані результати повністю корелюють із побудованими CFD-моделями у програмному продукті SolidWorks Flow Simulation та підтверджують гіпотезу про доцільність інтеграції методів обчислювальної гідродинаміки у процес проектування інноваційного устаткування.

Для реалізації сучасних методів проектування, отримані реологічні константи ( $\tau$ ,  $\mu$ ,  $\epsilon_h$ ) інтегруються в обчислювальні середовища термогідродинаміки. Тісто моделюється як стисливе неньютонівське середовище з властивостями псевдопластичності.

Основними рівняннями, що описують рух тіста в робочому вузлі, є рівняння Нав'є-Стокса в поєднанні з реологічним законом ступеня (Power Law):

$$\tau = K \cdot D^n \quad (5)$$

де  $K$  – індекс консистенції (корелює з отриманою  $\mu_{\text{еф}}$ ;  $n$  – індекс течії, що відображає ступінь нелінійності деформації).

Інтеграція показника стисливості  $\epsilon_h$  дозволяє системі враховувати зміну густини маси залежно від локального тиску, що є критичним для визначення точної геометрії профільного каналу валків. Такий підхід дозволяє замінити дорогі натурні випробування цифровими експериментами, забезпечуючи високу точність прогнозування якісних показників бублика на стадіях формування, вистоювання та випікання.

При стисканні тіста в замкненому об'ємі вузла нагнітання виявляються унікальні властивості пружності, що обумовлені наявністю багатофазної структури. Під дією валків тісто стискається не лише механічно, а й структурно – через зменшення вільного об'єму між молекулами біополімерів.

Особливе значення має виділення вологи на поверхні тонко розкاتаного тіста після проходження профільного каналу. Цим фізичним явищем пояснюється ефект «глянцевої поверхні» та легкий відрив шару тіста від металевої поверхні валків. У мікромасштабі цей процес можна описати як примусову синерезисну дифузію вологи з внутрішніх капілярів до периферії під дією градієнта тиску.

З аналізу досліджень структуроутворення встановлено, що багаторазове плавне стискування сприяє інтенсифікації окислювальних процесів. Кисень повітря, що розчиняється в рідкій фазі тіста під тиском, виступає як акцептор водню, сприяючи утворенню дисульфідних містків ( $-S-S-$ ) між ланцюгами білків. Це зміцнює каркас тіста, що в подальшому позитивно впливає на його газотримувальну здатність під час вистоювання.

Інтеграція методів обчислювальної термогідродинаміки потребує врахування перетворення механічної енергії нагнітання в теплову. Хоча експериментально зафіксовано незначну зміну температури, у зонах високого зсуву (біля поверхонь валків) виникають локальні термічні градієнти.

Питома потужність  $N_s$ , що витрачається на деформацію одиниці маси тіста, визначається інтегральною функцією:

$$N_s = \int_V \tau \cdot \gamma dV \quad (6)$$

де  $\tau$  – напруження зсуву;  $\gamma$  – градієнт швидкості деформації.

Для бубличного тіста встановлено, що основна частина енергії (75–80%) витрачається на подолання сил внутрішнього тертя (в'язке дисипування), а решта – на пружне стиснення газової фази. Використання валків із оптимізованим зазором  $\delta = 30$  мм дозволяє перерозподілити ці потоки таким чином, щоб мінімізувати деструкцію клейковини при збереженні необхідного тиску нагнітання.

Використання отриманих експериментальних даних щодо ефективної в'язкості  $\mu_{\text{еф}}$ , показника рівня стискування  $\epsilon_h$  та модуля осьового стискування  $E$  дозволило реалізувати прецизійне комп'ютерне моделювання процесу в спеціалізованих CFD-пакетах (SolidWorks Flow Simulation). Тістова маса була задана як багатофазне стисливе неньютонівське середовище, що описується системою диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса.

Для максимальної відповідності моделі фактичним умовам перебігу процесу було застосовано реологічний опис середовища, в якому динамічна в'язкість розглядається як функція локальної швидкості зсувної деформації. Реалізація такого підходу забезпечила можливість просторового аналізу структури тістового потоку в зоні контакту валків та дала змогу локалізувати ділянки концентрації напружень.

Чисельні розрахунки засвідчили наявність областей підвищеної інтенсивності перемішування в межах пазів валків. Водночас встановлено, що за міжвалкового зазору 30 мм рух тіста відбувається переважно в ламінарному режимі, що суттєво зменшує ризик термічного перевантаження тістової маси та обмежує руйнування білкових структур.

На цифровій моделі чітко зафіксовано зону максимального тиску безпосередньо в центрі міжосьового простору. Саме тут відбувається основне подрібнення газової фази. Модель підтвердила, що отриманий нами показник  $\epsilon_h = -2,198$  відповідає тиску, який є достатнім для стабільного нагнітання без «видавлювання» вологи на поверхню.

Чисельний аналіз дозволив оптимізувати кут затягування  $\alpha = 60^\circ$ . Було встановлено, що при такому значенні виникає стабільний фрикційний контакт, який запобігає проковзуванню тіста, забезпечуючи рівномірність подачі напівфабрикату на наступні етапи формування.

Таким чином, інтеграція реологічних параметрів у CFD-модель дозволяє ще на етапі проектування устаткування прогнозувати якість готового виробу (об'єм та пористість), спираючись на точні дані про поведінку середовища під тиском.

### Висновки

На підставі виконаного комплексу теоретичних узагальнень і експериментальних досліджень, спрямованих на вивчення структурно-технологічних характеристик борошняних напівфабрикатів у процесі валкового нагнітання, сформульовано такі узагальнюючі положення:

1. Встановлено закономірності реологічної поведінки тіста як багатофазної структурованої системи в умовах інтенсивної механічної дії. Показано, що визначальним параметром, який адекватно відображає динаміку процесу, є допустиме напруження зсуву. На початковій стадії затягування тістової маси валками його значення досягає максимальних величин, що зумовлено опором сформованого білкового каркаса. Водночас упродовж перших трьох секунд нагнітання, внаслідок перерозподілу вологи та активного набухання колоїдних компонентів борошна, відбувається стабілізація структури з поступовим зниженням напруження зсуву до оптимального рівня близько 300 Па. Такий режим забезпечує рівномірний характер течії тіста в робочих каналах і запобігає надмірній механічній деградації білкових молекул.

Проаналізовано залежність ефективної в'язкості від швидкості зсувної деформації, що дало змогу ідентифікувати тістову масу як псевдопластичне середовище. Доведено, що зростання швидкості деформації до інтервалу 2,0 – 2,4 м/с сприяє орієнтації біополімерних ланцюгів у напрямку течії, унаслідок чого зменшується інтенсивність міжмолекулярної взаємодії та внутрішній опір руху. Отримані значення ефективної в'язкості на рівні  $1,3 \cdot 10^5$  Па·с є базовими для коректного налаштування параметрів чисельних моделей термогідродинаміки.

Експериментальними дослідженнями підтверджено доцільність застосування циклічно-неперервного режиму стискання тістової маси. Встановлено, що використання збільшеного міжвалкового зазору 30 мм за умови кратності обробки 5 – 7 циклів забезпечує оптимальне співвідношення між питомими енерговитратами та якістю структуроутворення. Реалізація такого режиму сприяє інтенсивному дробленню газових включень і їх рівномірному розподілу в об'ємі тіста, що забезпечує збільшення питомого об'єму готової продукції на 22 % та зростання показника пористості на 4 % порівняно з традиційними технологіями оброблення.

Обґрунтовано математичний апарат для прогнозування стану газової фази тіста на основі функціональної залежності зміни об'єму від прикладеного тиску. Введення показника ступеня стискання  $\epsilon_h$  до узагальненої реологічної моделі об'ємного деформування харчових мас [2] дало змогу формалізувати процеси ущільнення тіста, що є основою для прецизійного розрахунку геометричних параметрів профільних каналів валків. Доведено, що багаторазове плавне стискання не лише покращує фізико-механічні властивості напівфабрикату, а й активізує окислювальні процеси за рахунок дифузії кисню під тиском, що проявляється у характерному посвітленні м'якуша та підвищенні рівномірності пористої структури виробів.

Сформовано методологічні засади цифрового проектування інноваційного формувального устаткування. Запропонована інтеграція реологічних констант у методи обчислювальної гідродинаміки (CFD) забезпечує перехід від емпіричного вибору конструктивно-технологічних параметрів до точного моделювання енергетичних потоків і тепловиділення в робочих зонах машин. Це створює передумови для розроблення формувальних автоматів нового покоління з автоматизованим контролем структурно-механічних властивостей напівфабрикатів.

Результати CFD-моделювання узгоджуються з експериментальними даними [16] щодо впливу частоти обертання робочих органів на кінетику деформування тістових мас, що підтверджує універсальність і відтворюваність запропонованих наукових підходів.

Перспективи подальших досліджень у цьому напрямі пов'язані з розробленням інтелектуальних систем керування валковими нагнітачами, здатних у режимі реального часу адаптувати частоту обертання та величину міжвалкового зазору на основі даних датчиків в'язкості й тиску, забезпечуючи стабільну якість продукції за умов варіації властивостей вхідної сировини.

## Література

1. Стадник І. Я., Піддубний В. А., Федорів В. М., Хареба О. В., Підгорний В. В. Сучасні технології та енергетичні потоки при формуванні борошняних напівфабрикатів : монографія. Тернопіль : Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. 372 с.
2. Піддубний В. А. Реологія харчових мас : навч. посіб. Київ : НУХТ, 2017. 256 с.
3. Бондаренко В. В., Каретников Л. І. Дослідження рівнів стискання та реологічних характеристик тістових мас у валкових нагнітачах. Харчова промисловість. 2012. № 12. С. 34–39.
4. Теличкун Ю. С., Теличкун В. І. Математичне моделювання процесу нагнітання тіста у формувальних машинах. Наукові праці НУХТ. 2019. Т. 25, № 4. С. 130–137.
5. Прокопенко Н. Ф. Автоматизація контролю реологічних параметрів борошняних напівфабрикатів. Наукові праці НУХТ. 2018. Т. 24, № 2. С. 112–119.
6. Dritter B., Anandharamakrishnan C. Computational Fluid Dynamics in Food Processing. Boca Raton : CRC Press, 2019. 432 p.
7. Філімонова Н. В. Моделювання процесу нагнітання в'язко-пластичних харчових середовищ. Журнал інженерних наук. 2020. Т. 7, № 1. С. 12–18.
8. Дорохович В. В. Реологія кондитерських мас : підручник. Київ : НУХТ, 2015. 320 с.
9. Steffe J. F. Rheological Methods in Food Process Engineering. 2nd ed. East Lansing: Freeman Press, 1996. 418 p.
10. Павлов О. В. Проектування робочих органів валкових формувальних машин. Техніка та технології харчових виробництв. 2021. Вип. 28. С. 15–24.
11. Chakraborty S. Computational Fluid Dynamics in Food Processing. Singapore : Springer, 2018. 310 p.
12. Engmann J., Servais C. Characterizing the rheological behavior of wheat flour dough. Journal of Food Engineering. 2014. Vol. 124. P. 56–62.
13. Беркман Г. С., Піддубний В. А. Проектування робочих органів харчових нагнітачів. Наукові здобутки молоді. Київ : НУХТ, 2019. С. 145–147.
14. Phan-Thien N., Safari-Ardi M. Rheology of dough. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. 2018. Vol. 74. P. 137–150.
15. Драган І. В. Оптимізація конструкції валкових машин на основі CFD-аналізу. Технічний сервіс агропромислового комплексу. 2022. № 25. С. 88–94.
16. Fedoriv V. M., Stechyshyn M. S., Martynyuk A. V., Liukhovets V. V., Honcharuk V., Matsiuk I. Designing the influence of operational parameters on dough deformation during injection. Modern Engineering and Innovative Technologies. 2025. Issue 37, Part 1. Karlsruhe. P. 36–46.
17. Fedoriv V., Stechyshyn M., Martynyuk A., Liukhovets V., Lysenko I., Trofymchuk M. Design and construction of operational performance of modern flour mixers. SWorld-Ger Conference Proceedings. The current stage of development of scientific and technological progress. 2025. No. gec37-00. P. 7–11.

## References

1. Stadnyk, I. Ya., Piddubnyi, V. A., Fedoriv, V. M., Khareba, O. V., & Pidhomyi, V. V. (2021). Modern technologies and energy flows in the forming of flour semi-finished products. Ternopil: Ivan Puluj Ternopil National Technical University Publishing House. 372 p.
2. Piddubnyi, V. A. (2017). Rheology of food masses. Kyiv: National University of Food Technologies. 256 p.
3. Bondarenko, V. V., & Karetnikov, L. I. (2012). Investigation of compression levels and rheological characteristics of dough masses in roller injectors. Food Industry, No. 12, pp. 34–39.
4. Telychkun, Yu. S., & Telychkun, V. I. (2019). Mathematical modeling of the dough injection process in forming machines. Scientific Works of NUFT, Vol. 25, No. 4, pp. 130–137.
5. Prokopenko, N. F. (2018). Automation of control of rheological parameters of flour semi-finished products. Scientific Works of NUFT, Vol. 24, No. 2, pp. 112–119.
6. Dritter, B., & Anandharamakrishnan, C. (2019). Computational fluid dynamics in food processing. Boca Raton: CRC Press. 432 p.
7. Filimonova, N. V. (2020). Modeling of the injection process of viscoplastic food media. Journal of Engineering Sciences, Vol. 7, No. 1, pp. 12–18.
8. Dorokhovych, V. V. (2015). Rheology of confectionery masses. Kyiv: National University of Food Technologies. 320 p.
9. Steffe, J. F. (1996). Rheological methods in food process engineering (2nd ed.). East Lansing: Freeman Press. 418 p.
10. Pavlov, O. V. (2021). Design of working bodies of roller forming machines. Machinery and Technologies of Food Production, Issue 28, pp. 15–24.
11. Chakraborty, S. (2018). Computational fluid dynamics in food processing. Singapore: Springer. 310 p.
12. Engmann, J., & Servais, C. (2014). Characterizing the rheological behavior of wheat flour dough. Journal of Food Engineering, Vol. 124, pp. 56–62.
13. Berkman, H. S., & Piddubnyi, V. A. (2019). Design of working bodies of food injectors. In Scientific Achievements of Youth. Kyiv: National University of Food Technologies, pp. 145–147.
14. Phan-Thien, N., & Safari-Ardi, M. (2018). Rheology of dough. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol. 74, pp. 137–150.
15. Dragan, I. V. (2022). Optimization of roller machine design based on CFD analysis. Technical Service of the Agro-Industrial Complex, No. 25, pp. 88–94.
16. Fedoriv, V. M., Stechyshyn, M. S., Martynyuk, A. V., Liukhovets, V. V., Honcharuk, V., & Matsiuk, I. (2025). Designing the influence of operational parameters on dough deformation during injection. Modern Engineering and Innovative Technologies, Issue 37, Part 1. Karlsruhe, pp. 36–46.
17. Fedoriv, V., Stechyshyn, M., Martynyuk, A., Liukhovets, V., Lysenko, I., & Trofymchuk, M. (2025). Design and construction of operational performance of modern flour mixers. SWorld-Ger Conference Proceedings. The current stage of development of scientific and technological progress, No. gec37-00, pp. 7–11.