

УДК 664.653.1

RHEOLOGICAL APPROACH TO ROLLER PUMPING OF THE ENVIRONMENT

O. Shevchenko, N. Tkachuk

National University of Food Technologies

I. Stadnyk, A. Derkach

Ternopil Ivan Puluj National Technical University

Key words:

*Three phase medium
Rollers
Rheology
Shear strain
Dough
Gas phase*

Article history:

Received 06.11.2016

Received in revised form

18.11.2016

Accepted 14.12.2016

Corresponding author:

O. Shevchenko

E-mail:

npuht@ukr.net

ABSTRACT

The analysis of model representations of three-phase environment and their behavior during deformation effects in the bulk feed rollers was performed. The lack of reliability was specified and the patterns of rational and geometric parameters were established. The influence of engineering rheology on the environment was studied and the analytical mechanical model for determining the optimum value of shear strain was developed on its basis to ensure the reliable operation of a roller pumping mechanism.

РЕОЛОГІЧНИЙ ПІДХІД ДО ВАЛКОВОГО НАГНІТАННЯ СЕРЕДОВИЩА

О.Ю. Шевченко, Н.А. Ткачук

Національний університет харчових технологій

І.Я. Стадник, А.В. Деркач

Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя

У статті проведено аналіз модельних представлень трифазового середовища та описано їхню поведінку при деформаційних впливах в об'ємній подачі валками, відзначено недостатню надійність їх роботи та встановлено закономірності й раціональні геометричні параметри. 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.

Ключові слова: *трифазове середовище, валки, реологія, деформація зсуву, тісто, газова фаза.*

Постановка проблеми. Хлібопекарській і кондитерській промисловості притаманна своя специфіка й різноманітність технологічних процесів, тому

машинобудівна промисловість випускає для неї обладнання великої номенклатури, в ряді випадків металомісне та кінематично складне. Характерною особливістю формувального обладнання (ФО) є наявність валкових рухомих робочих органів, що механічно впливають на середовище при безпосередньому контакті з ним.

В Україні і за кордоном ведуться інтенсивні роботи з розробки нового покоління високоефективного обладнання для згаданої промисловості з використанням різних конструкцій валкових робочих органів. Основною вимогою до проектування такого обладнання є розробка конструкцій за технічними характеристиками замовника в короткий інтервал часу з малими витратами і високою надійністю. Індустріальні технології потребують розробки автоматизованих комплексів із комп'ютерним програмним управлінням, які нададуть можливість оперативно реагувати на сьогоденні вимоги до довговічності і якості роботи машин.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З аналізу даних літературних джерел і досліджень підприємств кондитерської промисловості випливає, що якість виконуваної роботи валками залежить від комплексу параметрів, які можна поділити на такі категорії:

- форма, кінематика, стан і геометричні параметри валка;
- експлуатаційні умови роботи: зазор між валками, зусилля взаємного стискання середовища, частота їх обертання;
- фізико-хімічні властивості середовища;
- особливості тертя в рідких електропровідних середовищах.

Робочі середовища даних галузей за своїм складом і природою дуже різноманітні. Їх умовно можна розділити на газоподібні, рідкі, тверді, що містять хімічні та поверхнево-активні речовини.

Значна кількість речовин у середовищі, зміна їх концентрацій, взаємодія між ними і мікроорганізмами, наявність стимуляторів, тощо призводять до відносної нестабільності системи. За таких умов досить складно оцінювати впливи окремих факторів. З першого погляду може здатися, що в найкращому випадку мають відповідати максимальні значення на верхніх рівнях факторів впливу. Проте негативні наслідки також слід програмувати, наприклад, за величинами осмотичних тисків, подвійних і потрійних впливів факторів, погіршення якісних показників продукції тощо.

Оцінювати впливи комбінацій факторів тим більш складно. Якщо вплив температури ретельно можна відслідкувати, то стосовно впливу тиску єдиної точки зору не існує [1]. Проте положення термодинаміки тісно пов'язують параметри тиску і температури в газових законах, рівнянні Менделєєва-Клапейрона, законі Генрі тощо.

Оскільки такі впливи, як дія валків на тісто, досліджено недостатньо, то для правильного вибору їх характеристик, в умовах різних значень температур, тисків, а також для вивчення природи цього процесу велике значення має визначення дійсної швидкості реологічного процесу.

Утворювана диспергована газова фаза, що подається на валки є кількокомпонентною і такою, що складається з діоксиду вуглецю та частково з випаровувань води, спирту та інших речовин. Проте в цій диспергованій фазі

переважає тверда частка, тому в подальшому будемо орієнтуватися на трифазову систему.

Оцінку впливу валків можна здійснити на основі закону Архімеда, прояв якого має місце в дії на дисперговану газову фазу. За визначеної газотримувальної здатності досягається можливість за вказаним законом визначити загальну силову дію на середовище. При цьому вважаємо, що ця рушійна сила розсосереджена в масиві тіста. Така особливість силової дії у повному об'ємі середовища з певним припущенням може сприйматися аналогами напружень і напружених станів. Проте, на відміну від понять напружених станів у твердих тілах, у даному випадку існує певна особливість, суть якої полягає в тому, що середовище перебуває в динамічному стані з порушенням його умови суцільності.

Відомо [2; 3], що газотримувальна здатність середовища визначається величиною генерованого газового потоку, та залежить від швидкості спливання бульбашок газової фази. При цьому розрізняють швидкість абсолютну і відносну. Саме відносна швидкість визначає, за інших рівних умов, опір переміщенню бульбашок рідинної фази в деформованому тісті. Оскільки опір визначається фізико-хімічними властивостями середовища, то він залежить від геометрії нагнітального механізму, рівномірності розподілення потоку газової фази, організації перехідних процесів, збурень, усталених режимів тощо.

Швидкоплинне наростання внутрішнього тиску в тістовій заготовці відбувається через розширення газової фази з відповідним доповненням її кількості у зв'язку з десорбцією розчиненої частини газової фази. Очевидно, що такий перехідний процес стосується не лише газової фази, а й рідинної, оскільки збільшення об'єму газової фази визначає зростання об'єму трифазової суміші і переміщення фаз [3].

Мета дослідження: розробити аналітичну механічну модель для визначення оптимального значення деформації зсуву в процесі нагнітання тіста валками.

Викладення основних результатів дослідження. Для машин з валковими робочими органами основними функціями є надання заготовкам потрібної форми і розмірів, точності дозування і якості виробів, швидкості й тривалості деформації. Для збереження форми і якості виробів валкові машини повинні забезпечити мінімальну кратність обробки маси і створити необхідний тиск для надання заготовкам необхідної форми. Важливе значення при валковому нагнітанні має поверхня валків і в'язкість оброблюючої маси.

Недостатньо надійна робота валкових тістоподільних, тістомісильних і формувальних машин обумовлена недостатньо розвинутою поверхнею валків, що знижує ефект взаємодії оброблювальних мас з ними. За час розкачування на тістову масу зі сторони робочого органу діє значне навантаження, яке обумовлює течію високов'язкого середовища між двома, близько одна до одної, поверхнями валків. У результаті цих дій заготовка ущільнюється і частково погіршується якість виробу.

На основі ґрунтовного аналізу процесів валкового впливу на середовище встановлено, що під час затягування маси в об'ємі робочої камери нагнітання кінетична крива деформації має три характерні ділянки. Кожна ділянка

відображає певний у часі період процесу. Крива течії характеризує ступінь рівноважного руйнування структури залежно від інтенсивності механічних впливів у всьому можливому діапазоні зміни ефективної в'язкості. З цього випливає, що єдиної формули, яка охоплює всі режими течії і не суперечить наявності лінійних ділянок на реологічній кривій, не може існувати. Жодна формула при скінченних значеннях $\dot{\gamma}$ не може в одному інтервалі давати лінійну, а в іншому — нелінійну залежність [1].

Будь-який реальний матеріал володіє всіма реологічними властивостями, вираженими різною мірою. Відповідно, і дріжджове пшеничне тісто залежно від величини напружень, часу їх дії, швидкості деформації може проявляти пружно-еластичні або пластично-в'язкі властивості [3].

Складність одержання форми, забезпечення формоутримувальних властивостей тіста і визначення раціональних режимів обробки полягає в тісному взаємному зв'язку між кількістю факторів, що впливають на надійність валків та якість процесу і виробу, тобто:

- наявність механічних дій валків на процес, які не дають змоги здійснювати контрольні вимірювання;
- застосування обладнання з валковими робочими органами, що розроблене без врахування структурно-механічних і специфічних властивостей переробляючої сировини (напівфабрикатів);
- наявність зворотних зв'язків між властивостями сировини і конструктивними показниками обладнання, що відбувається без якісного контролю перебігу процесу;
- неможливість впливати на структурно-механічні властивості середовища в період процесу.

Це дає змогу встановити їхні закономірності й обчислити раціональні параметри окремих операцій, тобто ґрунтовно оцінити вплив конструктивних параметрів: робочої камери та поверхні валка при відповідному куті затягування маси; конструктивних елементів на точність проходження процесу та властивості тіста після витікання його із зазору; питоме споживання енергії, надійність і тривалість роботи валкової машини.

Загалом тісто є складним біополімером, деформаційну поведінку якого при механічних впливах можна описати за допомогою загальноприйнятих моделей реологічних тіл. Так, для спрощення складання реологічних рівнянь біотехнологічних систем застосовують механічні моделі (пружину, пару тертя ковзання, циліндр з рідиною і поршень з отворами), що імітують основні властивості простих ідеальних тіл (пружність, пластичність, в'язкість) [4; 6; 7]. Дані моделі можна комбінувати, розташовуючи їх паралельно, послідовно, змішано. Основними реологічними моделями для моделювання тіста є модель пружно-в'язкого тіла з релаксацією деформацій (Максвелла), в'язко-пластичного тіла (Шведова-Бінгама) та деякі інші.

В'язкість ньютонівських рідин, до яких належить тісто, залежить від швидкості деформації під дією зусиль валків, пов'язаною із структурою та його зміною при течії. У свою чергу, текучість тіста залежить від його природи і фізико-механічних властивостей: концентрації, температури, вологості, кислотності, рецептури [5; 6]. Крім того, деформація в зоні нагнітання

не завжди пропорційна навантаженню, тому що на цей процес впливають внутрішнє тертя і зовнішнє [5]. Для опису текучості тіста між валками прийнятним є рівняння течії бінгамівської рідини:

$$\theta = \theta_0 + \eta_{\text{пл}} \dot{\gamma},$$

де θ — напруження зсуву; θ_0 — межа плинності (початкове напруження зсуву); $\eta_{\text{пл}}$ — пластична в'язкість; $\dot{\gamma}$ — швидкість зсуву.

При розрахунку обладнання для валкової обробки тіста необхідно виходити з найбільш імовірних значень його реологічних характеристик, які мають місце на практиці, тому загальна модель деформації буде дорівнювати сумі деформацій, що відбуваються в робочій камері нагнітального вузла машини. Для опису поведінки тіста при дії валків у нагнітальному вузлі формувальної машини запропонована механічна модель, у склад якої входить зміна реології середовища (тіста) за період процесу (рис. 1).

За період дискретної дії валків на тісто напруження зсуву в ньому постійно змінюється. Час прикладання сил деформацій (затягування, стискання, витікання) настільки малий, що миттєво досягається граничне напруження зсуву. Тісто спочатку в'язко-пружно деформується (G, η), а потім, при напруженні, що перевищує граничне напруження зсуву (ГНЗ), воно пластично деформується і починає текти. При стисканні тіста валками відбувається часткове перемішування середовища, його частковий зворотній рух, тому воно проявляє себе подібно до тіла Бінгама, що поєднує пружність, в'язкість, пластичність.

Реологічні рівняння механічної моделі нагнітання тіста валками можна отримати таким чином.

Загальна деформація моделі процесу дорівнює сумі деформацій:

$$d\gamma = d\gamma_3 + d\gamma_c + d\gamma_m,$$

де $d\gamma_3$, $d\gamma_c$, $d\gamma_m$ — деформації, відповідно, тіл Максвелла, Бінгама, Шведова. Беручи похідну від лівої і правої частин рівняння, отримаємо:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{d\gamma_3}{dt} + \frac{d\gamma_c + d\gamma_m}{dt}. \quad (1)$$

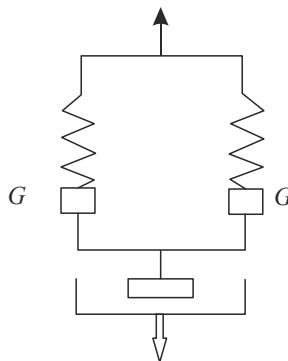


Рис. 1. Реологічна модель тіста при нагнітанні валками

Величину $\frac{d\gamma_3}{dt}$ визначимо з рівняння пружно-в'язкого релаксуючого тіла Максвелла, що являє собою послідовно з'єднані моделі Гука і Ньютона:

$$\frac{d\gamma_3}{dt} = \dot{\gamma} = \frac{\dot{\theta}}{G} + \frac{\theta}{\eta}. \quad (2)$$

У міру збільшення часу t деформація збільшується й асимптотично наближається до величини $\dot{\gamma} = \frac{\theta - \theta_T}{\eta_{пл}}$. Отже, деформація не розвивається миттєво,

а затримується за рахунок допустимих умов текучості (зворотній рух).

Відповідно, величина деформації при початковій течії тіста через зазор між валками визначається за рівнянням Шведова [6; 7]:

$$\dot{\gamma} = \frac{\theta - \theta_T}{\eta_{пл}} + \frac{\dot{\theta}}{G}. \quad (3)$$

Загальне рівняння реологічної моделі нагнітання тіста валками матиме такий вигляд:

$$\begin{aligned} \dot{\gamma} &= \frac{\dot{\theta}}{G} + \frac{\theta}{\eta} - \frac{\theta - \theta_T}{\eta_{пл}} + \frac{\theta - \theta_T}{\eta_{пл}} + \frac{\dot{\theta}}{G}; \\ \dot{\gamma} &= \frac{\dot{\theta}}{G} + \frac{\theta}{\eta} + \frac{\dot{\theta}}{G}. \end{aligned} \quad (4)$$

Механічна реологічна модель і її математичний опис (4) потрібні не лише для об'єктивної оцінки консистенції тіста, але і для можливості оцінки на всіх стадіях комплексної механічної обробки. Будемо вважати, що в момент $t = 0$ надано валками напруження θ_0 і в'язка деформація рівна нулю, тому деформація тіста буде рівна тільки пружній деформації:

$$\gamma_0 = \frac{\theta_0}{G}.$$

Дана деформація не змінюється в часі, тобто $\gamma = \gamma_0$, тоді $\dot{\gamma} = 0$, тому рівняння (4) матиме вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{\theta}{G} + \frac{\theta}{\eta} + \frac{\theta}{G} &= 0; \\ 2\frac{\dot{\theta}}{G} + \frac{\theta}{\eta} &= 0; \\ \frac{2}{G} \frac{d\theta}{dt} &= -\frac{\theta}{\eta}. \end{aligned}$$

Помножимо обидві частини рівняння на dt / θ :

$$\frac{2}{G} \frac{d\theta}{\theta} = -\frac{1}{\eta} dt;$$

Проінтегрувавши, одержимо:

$$\frac{2}{G} \int \frac{d\theta}{\theta} = -\frac{1}{\eta} \int dt;$$
$$\frac{2}{G} \ln|\theta| = -\frac{1}{\eta} t + c.$$

Сталу інтегрування c визначимо за таких початкових умов: $t = 0$, $\theta = \theta_0$, тоді

$$c = \frac{2}{G} \ln|\theta_0|.$$

Отже,

$$\frac{2}{G} \ln|\theta| = -\frac{1}{\eta} t + \frac{2}{G} \ln|\theta_0|;$$
$$\frac{2}{G} (\ln|\theta| - \ln|\theta_0|) = -\frac{1}{\eta} t;$$
$$\frac{2}{G} \ln \left| \frac{\theta}{\theta_0} \right| = -\frac{1}{\eta} t;$$
$$\ln \left| \frac{\theta}{\theta_0} \right| = -\frac{G}{2\eta} t;$$
$$\frac{\theta}{\theta_0} = e^{-\frac{G}{2\eta} t}.$$

Величина деформації тіста при дії валків становить:

$$\theta = \theta_0 e^{-\frac{G}{2\eta} t}.$$

Деформації тіста не розвивається миттєво, а затримується внаслідок пружних впливів. Величина $\frac{G}{\eta}$ характеризує швидкість затухання деформації.

Якщо $t = 0$, то $\theta = \theta_0$, а якщо $t = T_{\text{рел}} = 2 \frac{\eta}{G}$, то $\theta = \frac{\theta_0}{e}$, тобто період релаксації в тісті — це час, за який напруження падає в e разів, де e — основа натуральних логарифмів. При збільшенні t напруження θ зменшується, а при $t \rightarrow \infty$ тісто переходить у ненапружений стан.

Висновки

Механічна реологічна модель нагнітання тіста валками і її математичний опис потрібні не лише для об'єктивної оцінки консистенції тіста за короткий процес, а й для можливості оцінити його поведінку на всіх стадіях, що дає змогу розробити нові конструкції валкових пристроїв.

Література

1. Горбатов А.В. Реология мясных и молочных продуктов. — Москва : Пищевая промышленность, 1979. — 383 с.
2. Коваль О.В. Удосконалення процесів і модернізація обладнання бродильних виробництв: автореф. дис. ... к.т.н.: 05.18.12 / Коваль О.В. — Київ, 2016. — 20 с.
3. Стадник І.Я. Науково-технічні основи процесів та розробка обладнання для безлопатєвого змішування тіста : автореф. дис. ... д-ра. тех. наук. — Київ, 2013. — 42 с.
4. Зайцев А.В., Пеленко Ф.В. Моделирование течения вязкой жидкости в трубе [Электронный ресурс] : электронный научный журнал «Процессы и аппараты пищевых производств». — Электронный журнал. — Санкт-Петербург: СПбГУНиПТ, 2012. — № 1.
5. Николаев Б.А. Измерение структурно-механических свойств мучного теста / Б.А. Николаев. — Москва : Пищевая промышленность, 1976. — 246 с.
6. Гуськов К.П. Реология пищевых масс / К.П. Гуськов, Ю.А. Мачихин, С.А. Мачихин, Л.Н. Лунин. — Москва : Пищевая промышленность, 1970. — 207 с.
7. Мачихин Ю.А. Инженерная реология пищевых материалов / Ю.А. Мачихин, С.А. Мачихин. — Москва : Легкая и пищевая промышленность, 1991. — 216 с.

РЕОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ВАЛКОВОМУ НАГНЕТАНИЮ СРЕДЫ

А.Е. Шевченко, Н.А. Ткачук

Национальный университет пищевых технологий

И.Я. Стадник, А.В. Деркач

Тернопольский национальный технический университет им. И. Пулюя

В статье проведен анализ модельных представлений трехфазной среды и описано их поведение при деформационных воздействиях в объемной подаче валками, отмечена недостаточная надежность их работы, установлены закономерности и рациональные геометрические параметры. Рассмотрено влияние инженерной реологии на среду, и на ее основе выведено аналитическую механическую модель для определения оптимального значения деформации сдвига с целью обеспечения надежной работы валкового нагнетательного механизма.

Ключевые слова: *трехфазная среда, валки, реология, деформация сдвига, тесто, газовая фаза.*