

М. С. Шпак, асистент

M. S. Shpak

І. М. Литовченко, канд. техн. наук

I. M. Litovchenko

**ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРУ НЕЛІНІЙНОСТІ РЕОЛОГІЧНИХ РІВНЯНЬ
ПРИ ОПИСАННІ ПРОЦЕСУ ПЕРЕМІШУВАННЯ ХЛІБНОГО ТІСТА
DETERMINATION PARAMETER OF NON-LINEARITY OF REOLOGICAL
EQUALIZATIONS AT DESCRIPTION OF PROCESS OF INTERFUSION
OF PANARY DOUGH**

Визначено параметр нелінійності реологічних рівнянь при описанні процесу перемішування хлібного тіста. Досліджено зміну в'язкості в процесі замісу.

Certainly parameter of non-linearity of reological equalizations at description of process of interfusion of panary dough. Investigational change of viscosity in the process of premix.

Ключові слова: *хлібопекарське виробництво, в'язкість, швидкість зсуву.*

Key words: *bread production, viscosity, speed of change.*

Більшість харчових продуктів, в тому числі хлібне тісто, відносяться до неньютонівських рідин, в'язкість яких залежить від швидкості деформації зсуву.

На даний час ще недостатньо повно визначені реологічні та гідродинамічні характеристики хлібного тіста під часу замісу, так як визначити швидкості деформації зсуву одночасно в кожній точці місильної ємкості не уявляється можливим.

Що стосується зв'язку в'язкості різних неньютонівських рідин та тривалості зсуву, то Валентас [2] запропонував класифікувати дані рідини таким чином:

- рідини з властивостями, які не залежать від тривалості зсуву;
- рідини з властивостями, які залежать від тривалості зсуву;
- рідини, які демонструють властивості твердого тіла.

Кожен з вищеназваних класів можна описати відповідними реологічними рівняннями та кривими течій.

Загальне рівняння для опису поведінки псевдопластичних рідин (рідин, для яких відсутня межа текучості) було запропоновано Оствальдом:

$$\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n \quad (1)$$

де: $\dot{\gamma}$ - швидкість деформації зсуву, с^{-1}

n – індекс течії, що характеризує ступінь неньютонівської поведінки матеріалу. Чим більше n відрізняється від одиниці, тим виразніше проявляються неньютонівські властивості течії.

k – коефіцієнт консистенції, $\text{Па} \cdot \text{с}^n$

Коефіцієнт консистенції залежить від природи матеріалу та пропорційний показнику в'язкості при одиничному значенні градієнта швидкості зсуву; в даному випадку, під цим мається на увазі в'язкість неньютонівських рідин, значення якої залежить від швидкості деформації зсуву.

Для псевдопластичних рідин індекс течії знаходиться в межах $0 < n < 1$, для дилатантних $n > 1$. При $n = 1$ – рідина поводить себе як ньютонівська.

У випадку опису поведінки течії хлібного тіста, ряд дослідників [4] використовують рівняння Шведова – Бінгама:

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (2)$$

де: τ_0 – початкове напруження зсуву, Па, (цей компонент рівняння введений через те, що хлібне тісто є складною колоїдною системою, яка складається з твердої, рідкої та газоподібної фаз, тому поряд з тиксотропними, проявляє ще й окремі властивості твердого тіла; течія даного типу в'язких рідин проявляється лише при досягненні певного напруження зсуву);

μ – показник в'язкості, який характеризує опір середовища при переміщенні одного його внутрішнього шару відносно іншого, Па·с.

Автори формули вважають, що n - параметр нелінійності для даної речовини дорівнює одиниці.

Взагалі, параметр n важливий для розуміння та точного опису процесів, що відбуваються при русі тіста. В сучасній хлібопекарській галузі механічний вплив на тісто може відбуватись в широкому діапазоні швидкостей деформації. А це неминуче впливає на реологічні властивості тіста, іноді на 1...2 порядки змінюючи їх. Обмеження значення параметру нелінійності одиницею вже не дає повної картини опису поведінки тіста під час його замісу та обробки. Тому актуальним стає питання про його уточнення.

При аналізі залежності напруження зсуву хлібного тіста від швидкості деформації, авторами статті було встановлено, що так як крива течії не є прямою лінією, то для опису поведінки в'язкої тиксотропної рідини (до якої належить хлібне тісто) доцільніше використовувати рівняння Гершеля – Балклі:

$$\tau = \tau_0 + k \cdot \dot{\gamma} \quad (3)$$

З теорії [3,5] відомо, що найкраще перемішування відбувається при значній турбулізації потоку, на яку значний вплив має критерій Рейнольдса. В нього входять важливі величини, які визначають поведінку тіста при замісі:

$$Re = \frac{v \rho}{\mu} \quad (4)$$

де: v – характерна швидкість потоку, м/с; l – характерний лінійний розмір, м; ρ – густина рідини, кг/м³; μ – коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с.

Як зазначалося вище, в'язкість неньютонівських рідин є похідною від швидкості деформації зсуву, яка, в свою чергу, залежить від індексу течії n . Тому є доцільним визначити взаємні залежності названих параметрів для отримання даних виникнення турбулізації в місильній ємкості при замісі тіста.

Для отримання графіків залежностей, скористаємося загальновідомими даними [4], які наведені в табл. 1

Таблиця 1

Залежність реологічних показників тіста вологістю 44%

$\dot{\gamma}$, с ⁻¹	τ , Па	μ , Па·с
0,4	130	310
2,1	360	159
10,4	820	73,5
52,1	930	20
260,4	1800	7,3
1300	3800	3
3255	2100	1,1

Ці дані були оброблені за допомогою програми Curve Expert, яка дозволяє одночасно визначити як функціональні залежності між величинами, так і коефіцієнти кореляції r . (Найкращий показник сходимості рівняння досягається при наближенні r до одиниці. Достатній для адекватності сприйняття рівняння показник знаходиться в діапазоні 0,8...1.)

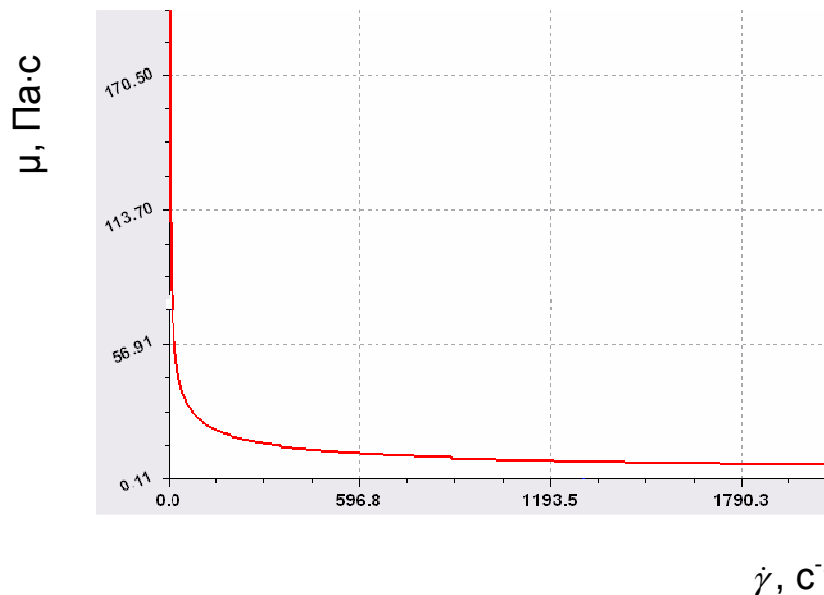


Рис. 1. Залежність в'язкості хлібного тіста від швидкості деформації зсуву

З графіку видно, що в'язкість тіста залежить від швидкості деформації зсуву нелінійно. Функціональний зв'язок між цими величинами можна представити як:

$$\mu = \frac{206}{\dot{\gamma}^{0,45}} \quad (5)$$

для якого $r = 0,996$.

Дана залежність вперше була отримана авторами та була використана в подальших дослідженнях.

Для визначення індексу течії n , скористаємося методикою, запропонованою Метцнером – Ридом. Цей метод ґрунтується на використанні відношення Муні – Рабиновича для напруження тертя на стінці.

Спочатку визначаємо залежність між напруженням зсуву τ та швидкістю деформації $\dot{\gamma}$ за даними з табл. 1.

В графічному вигляді вона представлена на рис.2.

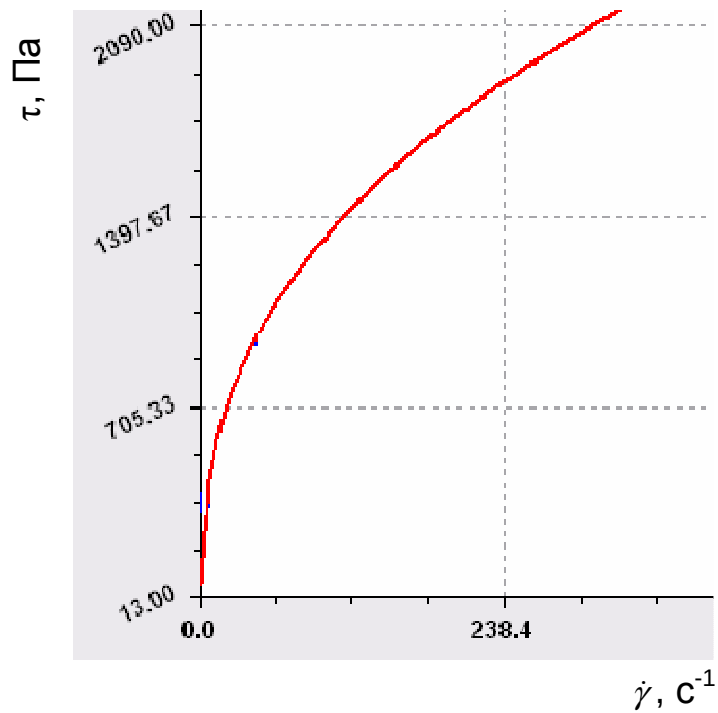


Рис. 2. Залежність напруження зсуву від швидкості деформації
В чисельному вигляді дана залежність виглядає так:

$$\tau = 212 \cdot \dot{\gamma}^{0,4} \quad (6)$$

при цьому $r = 0,993$.

Подальшим кроком є визначення індексу течії, який знаходиться за формулою [1]:

$$n = \frac{d \ln \tau}{d \ln \dot{\gamma}} \quad (7)$$

В графічному вигляді залежність представлена на рис. 3.

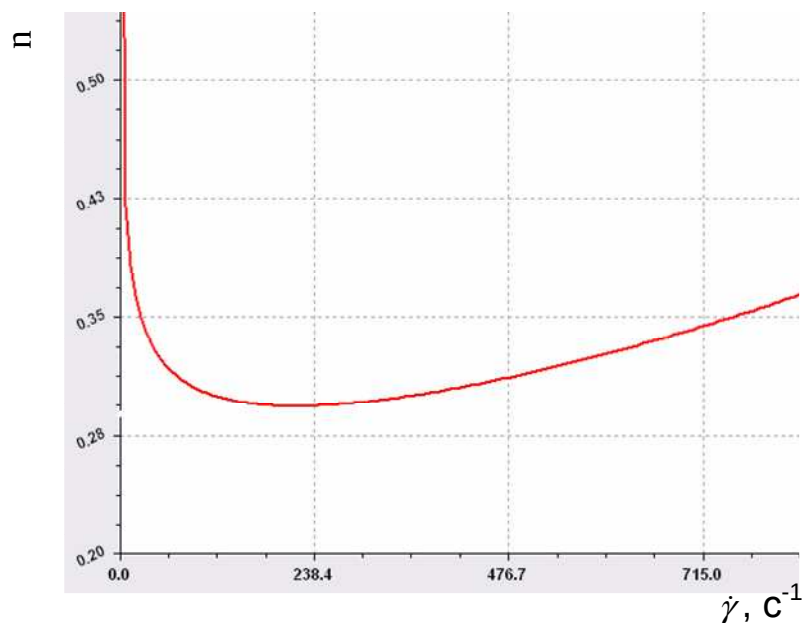


Рис. 3. Залежність індексу течії від швидкості деформації

Дана залежність чисельно описується формулою:

$$n = \frac{0,539}{\dot{\gamma}^{0,138}} \quad (8)$$

для якої $r = 0,823$.

Висновки. В результаті проведених досліджень, визначено рівняння, яке найбільш точно з існуючих описує поведінку тіста при замісі в діапазоні швидкостей деформації зсуву $0,4 \dots 3200 \text{ с}^{-1}$ та в'язкостей $1,1 \dots 310 \text{ Па} \cdot \text{с}$, а саме рівняння Гершеля – Балклі.

Для визначення показників рівняння отримано наступні залежності:

$$\begin{cases} \mu = \frac{206}{\dot{\gamma}^{0,45}} \\ n = \frac{0,539}{\dot{\gamma}^{0,138}} \end{cases} \quad (9)$$

Також визначено, що для тихохідних тістомісильних машин показник $n = 0,6$, а для машин інтенсивної дії - $n = 0,53$. Отримані дані дозволяють значно підвищити точність визначення енергетичних показників процесу заміса хлібного тіста.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Астарита Дж., Марруччи Дж.* Основы гидромеханики неньютоновских жидкостей: пер. с англ./ Д. А. Казенина.- М.: Мир, 1978. – 312 с.
2. *Валентас К. Д.* Пищевая инженерия: Справочник с примерами расчетов: пер. с англ./ К. Д. Валентас, Е. Ротштейн, Р. П. Сингх.- С.Пб.: Профессия, 2004. - 848 с.
3. *Лойцянский Л. Г.* Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1987. – 840 с.
4. *Николаев Б. А.* Структурно-механические свойства мучного теста. – М.: Пищевая пром-сть, 1976. – 247с.
5. *Федоткин И. М.* Интенсификация технологических процессов пищевых производств. – К.: Техника, 1984. – 174 с.

Надійшла до редколегії 27.05.09 р.