

УДК 664.653.8

EFFECT OF TEMPERATURE ON RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF LIQUID WHEAT SOURDOUGH

Y. Dolomakin

National University of Food Technologies

Key words:

*Wheat sourdough
Rheology
Viscometer
Temperature
Shear stress
Viscosity*

Article history:

Received 05.11.2015
Received in revised form
13.11.2015
Accepted 23.12.2015

Corresponding author:

Y. Dolomakin
E-mail:
dyy76@mail.ru

ABSTRACT

The rheological properties of the liquid wheat sourdough were determined as well as the effect of the temperature on its structural and mechanical properties, followed by the possibility of their use for the design of modern equipment. The temperature of 24...35 °C is optimal for the mixing stage of sourdough preparation, because it provides necessary mass flow with a uniform distribution of prescription components in it. The obtained structural and mechanical characteristics of the product confirmed a significant influence of test parameters on the structure. The results will simplify the choice of mixing device and its operation modes, which are sufficient to consider the device an ideal mixer.

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НА РЕОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РІДКОЇ ПШЕНИЧНОЇ ОПАРИ

Ю.Ю. Доломакін

Національний університет харчових технологій

У статті вивчено реологічні властивості рідкої пшеничної опари та характер впливу температури на її структурно-механічні властивості з поодальшою можливістю їх застосування для проектування сучасного обладнання. Температура проведення технологічної операції змішування опари 24...35 °C є оптимальною, забезпечуючи необхідну текучість маси при рівномірному розподіленні в ній рецептурних компонентів. Отримані структурно-механічні характеристики продукту підтверджують значний вплив досліджуваного параметра на його структуру, що в подальшому полегшить вибір змішувального пристрою та режимів його роботи, достатніх для того, щоб вважати апарат ідеальним змішувачем.

Ключові слова: пшенична опара, реологія, віскозиметр, температура, напруження зсуву, в'язкість.

Постановка проблеми. Пшеничне борошно можна віднести до біополімерних матеріалів, яке знаходить широке застосування в харчовій промисловості.

Найбільш поширеними способами його переробки у виробі є перемішування, екструзія, пресування тощо. При формуванні біополімерних матеріалів основне значення мають процеси течії в умовах зсувного деформування. За будь-якої швидкості переробки існує взаємозв'язок між температурою, прикладеною напругою, тиском всебічного стискання, з одного боку, і в'язкістю, еластичністю та іншими властивостями біополімерів — з іншого. Вивченням усіх аспектів деформування матеріалів під впливом прикладених напруг займається спеціальний розділ механіки — реологія.

У процесі переробки біополімерних матеріалів відбувається їх деформування, яке супроводжується структурними перетвореннями і зміною реологічних властивостей полімерів.

Зміна температури очевидно призводить до зміни практично всіх властивостей біополімерних матеріалів, тому питання вивчення впливу температурного фактора на їх реологічні властивості є актуальним.

Аналіз наукових публікацій. Одним із основних завдань, пов'язаних з гідродинамікою течії псевдопластичних рідин, до яких відноситься опара, є визначення реологічних залежностей.

Для апроксимації експериментальних даних найбільш поширеною в літературі є залежність Оствальда де Віля (степеневий закон), згідно з яким в'язкість апроксимується формулою [1]:

$$\eta = K \left| \frac{I_2}{2} \right|^{\frac{n-1}{2}}, \quad (1)$$

де I_2 – квадратичний інваріант тензора швидкості деформації:

$$\begin{aligned} \frac{I_2}{2} = & 2 \left[\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \\ & + \left[\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right]^2 + \left[\frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \right]^2 + \left[\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right]^2. \end{aligned} \quad (2)$$

Коефіцієнти K і n у загальному випадку залежать від швидкості зсуву і визначаються дослідним шляхом.

Для простого зсуву, коли відмінними від нуля є тільки компоненти τ і $\dot{\gamma}$, рівняння для визначення напружень має вигляд [1]:

$$\tau = K |\dot{\gamma}|^{n-1} \dot{\gamma}, \quad (3)$$

а для в'язкості:

$$\eta = K |\dot{\gamma}|^{n-1}. \quad (4)$$

Слід зазначити, що рівняння (4) є рівнянням прямої в логарифмічних координатах, проте криві течії найчастіше не є прямими, тому вони апроксимуються рівнянням (3) по частинах. Оскільки рідкі опари є псевдопластичними рідинами ($n < 1$), то при малих швидкостях деформації рівняння (3) також не може застосовуватись, бо значення в'язкості при цьому прогнозується безмежно великим.

У випадку неізотермічної течії (температура опари більша або менша за температуру навколишнього повітря) необхідно враховувати залежність в'язкості від температури. Показник степеня в багатьох випадках мало залежить від температури, а залежність коефіцієнта K від температури часто враховується законом Арреніуса [2]:

$$K = K_0 \exp \left[-\frac{\beta(T - T_0)}{T_0 + 273} \right], \quad (5)$$

де K_0 — коефіцієнт консистенції, знайдений для температури T_0 , а β — температурний коефіцієнт, який визначається експериментально. Тоді рівняння (3) набуває вигляду:

$$\tau = K_0 |\dot{\gamma}|^{n-1} \dot{\gamma} \exp \left[-\frac{\beta(T - T_0)}{T_0 + 273} \right]. \quad (6)$$

Дослідження реологічних властивостей рідких опар є об'єктом багатьох праць, у яких напрацьовано значний експериментальний матеріал віскозиметричних досліджень [3, 4, 7].

Мета дослідження. Виявлення впливу температури на реологічні властивості біополімерних систем, зокрема властивостей рідкої пшеничної опари залежно від температури технологічного процесу її виробництва.

Матеріали і методи дослідження. Матеріалом для досліджень слугувала рідка пшенична опара вологістю 65 %. Опара готувалася з борошна пшеничного вищого гатунку, вологість борошна складала $13,8 \pm 0,2$ %.

Вивчення реологічних характеристик рідкої опари проводили за допомогою ротаційного віскозиметра «Реотест-2» з циліндричним пристроєм в інтервалах температур проведення технологічного процесу виготовлення подібної сировини [5].

Прилад відноситься до CR-реометрів (англ. Controlled Rate Rheometer). В реометрах цього типу градієнт швидкості $\dot{\gamma}$ задається, а напруження зсуву τ визначається (система Сарле (Searle)).

Вимірювальний механізм приладу являє собою механічно-електричний перетворювач крутного моменту. Для вимірювання моменту обертання, чинного на обертовому вимірювальному циліндрі, використовується обертання вимірювального вала щодо приводного валу в напрямку, зворотному дії двоступеневого динамометра. Приладовий потенціометр, пов'язаний з динамометром і включений в мостову схему, відтворює величину відносного обертання. При цьому початковий сигнал (обертаючий момент) перетворюється на пропорційний йому аналоговий сигнал струму. Перемикачем діапазон τ динамометра встановлювали діапазони зсувної напруги в положення I і II з відношенням між ними приблизно рівним 1:10. Така можливість забезпечувала вимірювання зсувної напруги в широких межах без заміни вимірювального пристрою. Перемикач діапазону проводили за будь-яких умов роботи, тобто при обертанні вимірювального вала. Для цього встановлювали до упору перемикач діапазону в разі діапазону I біля лівого кінцевого положення, а в разі діапазону II у правому кінцевому положенні.

В'язкість текучого матеріалу залежить більшою мірою від температури. При вимірюванні в'язкості потрібно завжди точно визначати температуру. Для цього у «Реотест-2» вимірювальна ємність з дослідним матеріалом оточена термостатуючою банею. При цьому при підключенні до рідинного циркуляційного термостата забезпечується бездоганне термостатування вимірювального зазору.

Термостатуюча рідина вибиралася згідно з інструкцією з експлуатації термостата, діапазон температур у нашому випадку складав від 24 °С до 35 °С, тому як рідину використовували дистильовану воду.

Для встановлення консистентних властивостей системи рідких опар зразки поміщали в вимірювальний пристрій і термостатували протягом 30 хв при відповідних температурах. При цьому користувалися таким правилом: низька в'язкість і малі кільцеві зазори вимірювального пристрою вимагають більш короткого часу термостатування.

Після термостатування починали з вимірювань. Для проведення вимірювань можна виходити з того, що з точки зору функціонування приладу немає жорстких вимог щодо послідовності проведення робіт. Метод проведення вимірювань узгоджувався з конкретним досліджуваним матеріалом.

Під час вимірювань циліндр приладу обертали в вимірювальному пристрої при 24 швидкостях зсуву, ресструючи показники індикаторного приладу на кожній ступені. На підставі отриманих результатів розраховували величини граничного напруження зсуву та структурної в'язкості і будували реограми течії систем.

Результати і обговорення. Вивчення температурної залежності в'язкості біополімерних матеріалів необхідне для розуміння механізму процесу їх течії і з'ясування зв'язку між структурою рідкої опари та її поведінкою при деформуванні.

Між розрахованими вимірними значеннями і реологічними параметрами існує такий взаємозв'язок: зрушувальне напруження τ і швидкість зсуву $\dot{\gamma}$ відносяться до радіуса внутрішнього циліндра коаксіальної циліндричної системи.

Зсувне напруження дорівнює добутку постійної циліндра на значення шкали на індикаторному приладі, Па:

$$\tau = z \times \alpha, \quad (7)$$

де z — постійна циліндра, вказана в паспорті приладу, $z = 0,637$ Па/поділок шкали; α — значення шкали на індикаторному приладі, поділок шкали.

Зміна напруження зсуву передусім призводить до отримання кривої в'язкості.

З основного закону візкозиметрії [6]:

$$\tau = \eta \times \dot{\gamma}, \quad (8)$$

звідки в'язкість — це відношення

$$\eta = \tau / \dot{\gamma}, \quad (9)$$

де $\dot{\gamma}$ — швидкість зсуву, с^{-1} .

Отримані та розраховані результати узагальнені в таблиці.

Наступний етап досліджень передбачає побудову кривих течії (рис. 1) та структурної в'язкості (рис. 2) рідкої пшеничної опари вологістю 65 % за температур, які знаходяться в діапазоні від 24 до 35 °С. У результаті матема-

тичної обробки дослідних даних, отримані криві описуються експоненціальними функціями типу $\tau = K e^{-n/\gamma}$ саме для напруження зсуву τ :

за температури:

$$24\text{ }^{\circ}\text{C} \quad \rightarrow \quad \tau = 57,3 e^{-17/\gamma} \quad (10)$$

$$28\text{ }^{\circ}\text{C} \quad \rightarrow \quad \tau = 56,4 e^{-22/\gamma} \quad (11)$$

$$35\text{ }^{\circ}\text{C} \quad \rightarrow \quad \tau = 56 e^{-25/\gamma} \quad (12)$$

де K і n — емпіричні коефіцієнти, знайдені під час дослідів; e — основа натурального логарифму.

Для структурної в'язкості η криві описуються степеневими функціями типу $\eta = K \dot{\gamma}^{-n}$ і мають такий вигляд:

за температури:

$$24\text{ }^{\circ}\text{C} \quad \rightarrow \quad \eta = 4,3 \dot{\gamma}^{-0,5} \quad (13)$$

$$28\text{ }^{\circ}\text{C} \quad \rightarrow \quad \eta = 3,66 \dot{\gamma}^{-0,49} \quad (14)$$

$$35\text{ }^{\circ}\text{C} \quad \rightarrow \quad \eta = 3,5 \dot{\gamma}^{-0,5} \quad (15)$$

Для дослідження більш широкого діапазону швидкості зсуву продукту побудуємо криві структурної в'язкості в логарифмічних координатах. Криві в'язкості в подвійних логарифмічних координатах порівняно з цими ж кривими в лінійних координатах дають більш чітке уявлення про швидкість її зміни.

При логарифмуванні рівнянь (13—15) отримаємо рівняння, з якого очевидно, що графічна залежність у подвійних логарифмічних координатах $\lg \eta - \lg \dot{\gamma}$ буде прямою лінією. Це означає, що криві в'язкості, які можуть бути описані ступеневим реологічним рівнянням Оствальда де Вале, в подвійних логарифмічних координатах апроксимуються прямими лініями (рис. 3).

Таблиця. Зміна напруження зсуву і в'язкості рідкої опари від температури

| Швидкість зсуву $\dot{\gamma}$, c^{-1} | Покази індикаторного приладу α , поділок шкали | | | Зсувне напруження τ , Па | | | В'язкість η , Па·с | | |
|--|---|-------|-------|-------------------------------|---------|---------|-------------------------|----------|----------|
| | 24 °C | 28 °C | 35 °C | 24 °C | 28 °C | 35 °C | 24 °C | 28 °C | 35 °C |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 0,5 | 4,9 | 4,6 | 4,8 | 3,1213 | 2,9302 | 3,0576 | 6,2426 | 5,8604 | 6,1152 |
| 0,9 | 6,1 | 5,2 | 5,9 | 3,8857 | 3,3124 | 3,7583 | 4,317444 | 3,680444 | 4,175889 |
| 1 | 6,5 | 5,6 | 6,1 | 4,1405 | 3,5672 | 3,8857 | 4,1405 | 3,5672 | 3,8857 |
| 1,5 | 7,5 | 6,7 | 6,8 | 4,7775 | 4,2679 | 4,3316 | 3,185 | 2,845267 | 2,887733 |
| 1,8 | 8,5 | 7,1 | 7,4 | 5,4145 | 4,5227 | 4,7138 | 3,008056 | 2,512611 | 2,618778 |
| 2,7 | 9,9 | 8,9 | 9 | 6,3063 | 5,6693 | 5,733 | 2,335667 | 2,099741 | 2,123333 |
| 3 | 10,6 | 9,6 | 9,6 | 6,7522 | 6,1152 | 6,1152 | 2,250733 | 2,0384 | 2,0384 |
| 4,5 | 13,1 | 11,2 | 11,1 | 8,3447 | 7,1344 | 7,0707 | 1,854378 | 1,585422 | 1,571267 |
| 5,4 | 14,8 | 12,8 | 12,5 | 9,4276 | 8,1536 | 7,9625 | 1,745852 | 1,509926 | 1,474537 |
| 8,1 | 18,8 | 16,2 | 15,7 | 11,9756 | 10,3194 | 10,0009 | 1,478469 | 1,274 | 1,234679 |
| 9 | 20,4 | 17,2 | 16,5 | 12,9948 | 10,9564 | 10,5105 | 1,443867 | 1,217378 | 1,167833 |
| 13,5 | 25,9 | 21,8 | 21 | 16,4983 | 13,8866 | 13,377 | 1,222096 | 1,028637 | 0,990889 |
| 16,2 | 28,9 | 24,6 | 22,9 | 18,4093 | 15,6702 | 14,5873 | 1,136377 | 0,967296 | 0,900451 |
| 24,3 | 37,6 | 31,2 | 29 | 23,9512 | 19,8744 | 18,473 | 0,985646 | 0,817877 | 0,760206 |

Продовження табл.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-------|------|------|------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| 27 | 40 | 33,4 | 30,5 | 25,48 | 21,2758 | 19,4285 | 0,943704 | 0,787993 | 0,719574 |
| 40,5 | 53 | 42,5 | 40 | 33,761 | 27,0725 | 25,48 | 0,833605 | 0,668457 | 0,629136 |
| 48,6 | 59,1 | 48 | 43,8 | 37,6467 | 30,576 | 27,9006 | 0,774623 | 0,629136 | 0,574086 |
| 72,9 | 77,5 | 63,8 | 57,9 | 49,3675 | 40,6406 | 36,8823 | 0,677195 | 0,557484 | 0,50593 |
| 81 | 82,9 | 67,2 | 61,9 | 52,8073 | 42,8064 | 39,4303 | 0,651942 | 0,528474 | 0,486794 |
| 121,5 | 83 | 80,9 | 78,5 | 52,871 | 51,5333 | 50,0045 | 0,435152 | 0,424142 | 0,41156 |
| 145,8 | 83,1 | 82 | 82 | 52,9347 | 52,234 | 52,234 | 0,363064 | 0,358258 | 0,358258 |
| 218,7 | 83,2 | 82,1 | 82,1 | 52,9984 | 52,2977 | 52,2977 | 0,242334 | 0,23913 | 0,23913 |
| 243 | 83,3 | 82,5 | 84,2 | 53,0621 | 52,5525 | 53,6354 | 0,218363 | 0,216265 | 0,220722 |
| 437,4 | 83,4 | 82,7 | 84,3 | 53,1258 | 52,6799 | 53,6991 | 0,121458 | 0,120439 | 0,122769 |

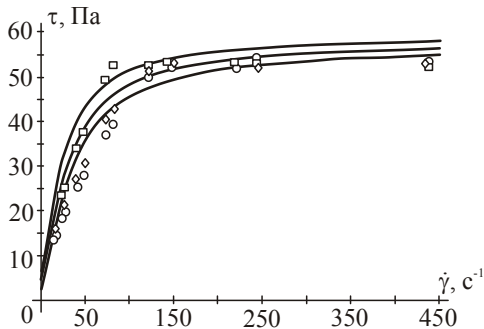


Рис. 1. Криві течії опари вологістю 65 % за різних температур (□ — 24 °C; ◇ — 28 °C; O — 35 °C)

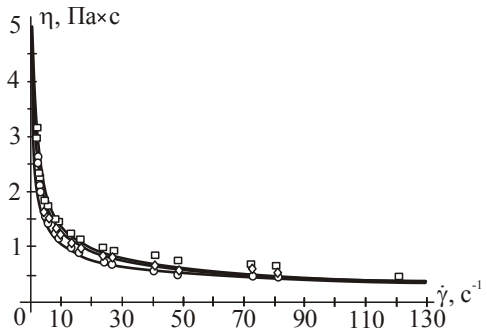


Рис. 2. Криві в'язкості опари вологістю 65 % за різних температур (□ — 24 °C; ◇ — 28 °C; O — 35 °C)

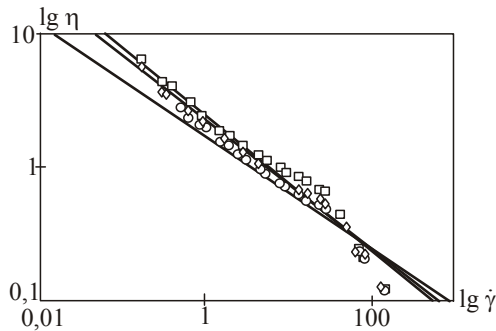


Рис. 3. Криві в'язкості опари в подвійних логарифмічних координатах (□ — 24 °C; ◇ — 28 °C; O — 35 °C)

Висновки

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити такі висновки: зміна напруження зсуву τ в діапазоні температур від 24 до 35 °C: при її зростанні, зменшує коефіцієнт консистенції рідкої пшеничної опари K в межах 2,3 %, тоді як абсолютні значення при малих швидкостях зсуву дають різницю у 6,1 %. Якщо напруження зсуву збільшуються на порядок, різниця складає вже 25,5 %, тому можна стверджувати, що при зростанні температури продукту напруження зсуву зменшуються.

Така ж тенденція характерна для структурної в'язкості η . При зростанні температури коефіцієнт консистенції зменшується на 18,6 %. Що стосується абсолютних значень, то різниця складає 11,8 % при малих швидкостях зсуву, тоді як при великих значеннях — усього 1,2 %. З практичної точки зору зниження температури призводить до підвищення в'язкості опари, що, у свою чергу, призводить до збільшення дисипації енергії і, як наслідок, до зростання його температури при механічній обробці.

При підвищенні температури до 35 °C структурна в'язкість опари знижується, але не перетворюється на ньютонівську систему, в ній так само домінують тиксотропні властивості, що пояснюється зменшенням внутрішньої молекулярної взаємодії.

На основі отриманих даних встановлено, що температурний режим приготування опари (процес змішування) в межах 24...35 °C створює достатню плинність маси для безперешкодного проведення технологічного процесу і тиксотропність маси, що забезпечує рівномірний розподіл борошняних часток у дисперсійному середовищі.

З технологічної точки зору опара, замішана при високій температурі, має слабшу консистенцію і при бродінні швидше розріджується. При підвищенні температури до 35 °C збільшується швидкість набухання і пептизації колоїдів, інтенсифікується дія ферментів, у результаті чого послаблюється клейковина.

Література

1. Радченко Л.Б. Переробка термопластів методом екструзії: Наук. посіб. — К.: ІЗМН, 1999. — 220 с.
2. Мікульонюк І.О., Радченко Л.Б. Переробка вторинної сировини екструзією. — К.: НТУУ “КПІ”, 2006. — 184 с.
3. Flander L., Suortti T., Katina K., Poutanen K. Effects of wheat sourdough process on the quality of mixed oat-wheat bread / LWT - Food Science and Technology. — 2011. — Vol. 44, Issue 3. — P. 656—664.
4. Galle S., Schwab C., Elke K. Arendt, Michael G. Gänzle Structural and rheological characterization of heteropolysaccharides produced by lactic acid bacteria in wheat and sorghum sourdough // Food Microbiology. — 2011 —Vol. 28, Issue 3. — P. 547—553.
5. Malkin A.Y., Isayev A.I. *Rheology*. Concepts, Methods, and Applications / 2nd edition. — ChemTech Publishing, 2012. — 510 p.
6. Rao M.A. *Rheology of Fluid, Semisolid, and Solid Foods: Principles and Applications* / 3rd ed. — Springer New York, Heidelberg, Dordrecht, London, 2014. — 461 p.
7. Пирогов А.Н. Реологические свойства сырья, полуфабрикатов и готовых изделий хлебопекарного, макаронного и кондитерского производств / А.Н. Пирогов, А.А. Леонов, А.В. Шиллов; КТИПП. — Кемерово, 2008. — 164 с.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖИДКОЙ ПШЕНИЧНОЙ ОПАРЫ

Ю.Ю. Доломакин

Национальный университет пищевых технологий

В статье изучены реологические свойства жидкой пшеничной опары и установлен характер влияния температуры на ее структурно-механические

свойства с последующей возможностью их применения для проектирования современного оборудования. Температура проведения технологической операции смешивания опары 24...35 °С является оптимальной, обеспечивая необходимую текучесть массы при равномерном распределении в ней рецептурных компонентов. Полученные структурно-механические характеристики продукта подтверждают значительное влияние исследуемого параметра на его структуру, что в дальнейшем облегчит работу по выбору смешивающего устройства и режимов его работы, достаточных для того, чтобы считать аппарат идеальным смесителем.

Ключевые слова: пшеничная опара, реология, вискозиметр, температура, напряжение сдвига, вязкость.