

Ю.С. Теличкун, канд. техн. наук,
В.І. Теличкун, канд. техн. наук,
В.М. Таран, д-р техн. наук,
В.С. Бодров, канд. техн. наук,
О.І. Кравченко

Національний університет харчових технологій

ОСОБЛИВОСТІ ТЕЧІЇ ГАЗОНАПОВНЕНОГО ТІСТА В ЦИЛІНДРИЧНОМУ ФОРМУВАЛЬНОМУ КАНАЛІ

Запропонований спосіб розрихлення тістових заготовок передбачає екструдування тіста, наповненого вуглекислим газом. На виході із формувального каналу відбувається значне збільшення діаметру тістового джгута, яке оцінюється коефіцієнтом розширення.

На створеній експериментальній установці отримані дані, які лягли в основу розрахунку епюри швидкості потоку газонаповненого тіста в залежності від вмісту газової фази. На основі проведених експериментальних досліджень і отриманої епюри швидкості потоку в циліндричному каналі нами розраховані критерії гідродинамічної подібності для потоку газонаповненого дріжджового тіста, отримана залежність критерію Eu від Re з урахуванням відношення довжини до діаметру каналу та розраховано значення критерію Eu в каналі та на виході з останнього, що дозволяє узагальнити проведені експериментальні та теоретичні дослідження течії газонаповнених неньютонівських матеріалів та сформулювати вимоги до конструкції формувальної матриці для екструзії газонаповненого тіста.

Ключові слова: екструдування, газонаповнене тісто, циліндричний канал, епюра швидкості, критерії гідродинамічної подібності

The proposed method loosening dough pieces involves extruding dough filled with carbon dioxide. The output of the channel is forming a significant increase in diameter dough bundle, which is estimated coefficient of expansion.

In an experimental setup findings that formed the basis for calculating curve flow gas-filled dough, depending on the content of the gas phase.

On the basis of experimental studies and received curve flow in a cylindrical channel we calculated the hydrodynamic similarity criteria for the flow of gas-filled dough and dependence criteria of Eu Re considering the ratio of length to diameter of the channel and the calculated value of the criterion Eu in the channel and the output of the latter, that can summarize the experimental and theoretical studies Non-Newtonian flow gas-filled materials and formulate requirements for the design matrix for extrusion molding gas-filled dough.

Key words: extruding, gas-filled dough, cylindrical channel, curve flow, hydrodynamic similarity criteria

Під час виробництва хлібобулочних виробів традиційним способом на стадії оброблення тістових заготовок перед випіканням використовується різне за призначенням обладнання для проведення ряду послідовних технологічних операцій. Особливо громіздким і складним цей процес є при виробництві джгутоподібних виробів із дріжджового тіста, до яких можемо віднести хлібні палички, сухарні шпали, багети та інше.

© Ю.С.Т. Теличкун, В.І. Теличкун, В.М. Таран, В.С. Бодров, О.І. Кравченко, 2012

Враховуючи проведені дослідження нами запропоновано поєднати процес формування тістових заготовок та їх розрихлення шляхом екструдуювання тіста насиченого вуглекислим газом за рахунок бродіння в закритій ємкості [1]. Узагальнюючи традиційні способи ведення технологічного процесу та враховуючи розроблений спосіб оброблення нами запропоновано розрізнати процес розрихлення тістових заготовок перед випіканням як: розрихлення в статичних умовах, що має місце в при традиційному вистоюванні та розрихлення в динамічних умовах при екструдуюванні тіста, насиченого вуглекислим газом.

За суміщення процесів формування і розрихлення особливою значення набуває поведінка тістового джгута на виході з формувального каналу, де внаслідок перепаду тиску (від тиску пресування до атмосферного) відбувається значне збільшення його діаметра, яке оцінюємо коефіцієнтом розширення і визначаємо як відношення діаметру джгута до діаметру формувального каналу.

Для впровадження у виробництво ефективного екструзійного обладнання для формування виробів із насиченого вуглекислим газом тіста, необхідне поглиблене дослідження процесів, що відбуваються при течії в різних зонах бродильно- формувального агрегату. Недостатньо вивчений процес течії газонаповнених матеріалів в каналах, особливо це стосується зв'язку попереднього плинну з наступною поведінкою джгута після виходу із формувального каналу.

Нами розроблена експериментальна установка, яка дає змогу провести широкий спектр досліджень як кінетичних факторів: середньої швидкості потоку, об'ємну, масову витрату, так і динамічних: визначити зміну густини тіста, її залежність від вмісту вуглекислого газу. Отримані експериментальні залежності використані нами в подальших розрахунках.

Розширення тістового джгута на виході є наслідком декількох процесів. Як показали дослідження, впливом геометрії вхідної зони в канал на розширення тістового джгута можливо знехтувати. Однак незалежно від геометрії входу виникають напруження, які релаксуються під час перебування в каналі. Залишкові напруження сприяють розширенню потоку на виході, що підтверджується дослідженнями; більше розширення джгута на виході при меншій довжині каналу. Крім того під час руху в каналі поперечний градієнт швидкості призводить до орієнтації високомолекулярних сполук вздовж потоку. На виході із каналу відбувається дезорієнтація молекул і вирівнювання профілю швидкості, що також приводить до деформації екструдату та збільшення перерізу джгута.

Допускаємо, що розширення екструдату буде сумарним по відношенню до розширення елементарних шарів, кожен із яких має товщину dr і деформується з постійною швидкістю зсуву γ_r .

Течію тіста в короткому циліндричному каналі матриці бродильно-формувального агрегату можемо розглядати як ламінарний потік псевдопластичної рідини, що підтверджує отримана нами залежність між напруженням та швидкістю зсуву [2]:

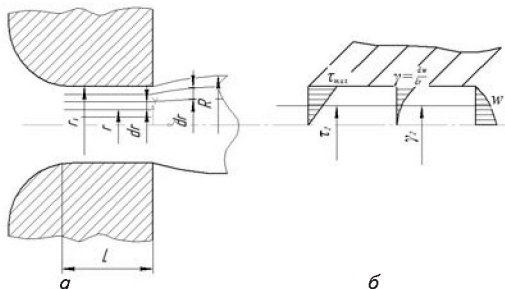


Рис.1. Схематичне зображення руху тістового джгута в каналі матриці і на виході з каналу (а), та розподіл напруження, швидкості зсуву, середньої швидкості потоку (б)

$$\tau = (-0,008 \cdot G + 0,83) \cdot \gamma^{0,457}, \quad (1)$$

де τ — напруження зсуву на стінці каналу, Н/м²; G — вміст вуглекислого газу в тісті, %; γ — швидкість зсуву, с⁻¹.

Як показали дослідження, густина тістового джгута ρ чітко корелює із вмістом газової фази в тісті G і може бути представлена залежністю:

$$\rho = 1380 - 13,5G, \text{ кг/м}^3 \quad (2)$$

Коефіцієнт розширення, як функція діаметру d і вмісту газової фази G матиме вигляд:

$$K_p = (36,6d + 1)G^{27,4+0,008} \quad (3)$$

Залежність середньої швидкості потоку від тиску екструзування P за різного вмісту газової фази:

$$w = 0,045e^{0,06G}P^{(-0,1G+1,9)} \quad (4)$$

Для визначення профілю швидкості в каналі скористаємося експериментально визначеними значеннями середньої швидкості потоку на деякій відстані від формувального каналу. Оскільки масова витрата є сталою величиною і на ділянці руху в каналі і на виході із останнього, а змінюється лише площа поперечного перерізу потоку та його середня швидкість $w_{\text{сеп}}$, тобто швидкість з якою мали б рухатись всі складові частини потоку тіста через переріз площею F , якби об'ємна витрата потоку дорівнювала б витраті V за дійсних швидкостей потоку:

$$w_{\text{сеп}} = \frac{V}{F} \quad (5)$$

Оскільки масова продуктивність $Q = V\rho$ в перерізі потоку на виході із каналу дорівнює масовій продуктивності на деякій відстані від останнього, тобто: $Q_k = Q_\infty$ то справедливою буде наступна рівність:

$$V_k \rho_k = V_\infty \rho_\infty \quad (6)$$

де V_k — об'ємна продуктивність на виході з каналу, $\text{м}^3/\text{с}$; ρ_k — густина тістового джгута на виході з каналу, $\text{кг}/\text{м}^3$; V_∞ — об'ємна продуктивність на деякій відстані від каналу, $\text{м}^3/\text{с}$; ρ_∞ — густина тістового джгута на деякій відстані від каналу, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Враховуючи вищесказане можемо записати:

$$w_{\text{сеп}}^k F^k \rho^k = w_{\text{сеп}}^\infty F^\infty \rho^\infty, \quad (7)$$

де $w_{\text{сеп}}^k$ — середня швидкість потоку в каналі, $\text{м}/\text{с}$; F^k — площа поперечного перерізу каналу, м^2 ; $w_{\text{сеп}}^\infty$ — середня швидкість потоку на деякій відстані від каналу, $\text{м}/\text{с}$; F^∞ — площа поперечного перерізу потоку на деякій відстані від каналу, м^2 .

Тоді середню швидкість в каналі знайдемо за умови, що всі інші величини отримані експериментальним шляхом:

$$w_{\text{сеп}}^k = w_{\text{сеп}}^\infty \frac{F^\infty \rho^\infty}{F^k \rho^k} \quad (8)$$

Враховуючи залежність профілю швидкості потоку в каналі для псевдопластичних рідин [3]:

$$w = \frac{n}{1+n} \left(\frac{\Delta P}{2l\eta} \right)^{\frac{1}{n}} \left(R^{\frac{n+1}{n}} - r^{\frac{n+1}{n}} \right), \quad (9)$$

де n — показник степеня в реологічному рівнянні; ΔR — різниця тиску по довжині каналу l , МПа; η — ефективна в'язкість газонаповненого тіста, Па·с.

Також використовуємо залежність між профілем швидкості та максимальною і середньою швидкістю:

$$w^k = w_{\text{сеп}}^k \left(\frac{3n+1}{n+1} \right) \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right], \quad w_{\text{сеп}}^k = w_{\text{cth}}^{\infty} \frac{F^{\infty} \rho^{\infty}}{F^k \rho^k}. \quad (10)$$

Розраховуємо максимальне, середнє значення швидкості та профіль швидкості по перерізу потоку в каналі в залежності від вмісту в тісті газової фази.

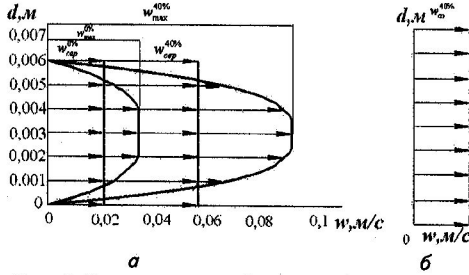


Рис. 2. Епюра швидкості по перерізу каналу *a* та на деякій відстані від виходу *б*

Результати розрахунків представлено на рис. 2 для тістового джута з вмістом газу 0 і 40 % і діаметра каналу 0,006 м.

На основі проведених експериментальних досліджень і отриманої епюри швидкості потоку в циліндричному каналі нами розраховані критерії гідродинамічної подібності для потоку газонаповненого дріжджового тіста та отримана залежність критерію *Eu* від *Re* з урахуванням відношення довжини (*l*, м) до діаметру (*d*, м) каналу (рис. 3).

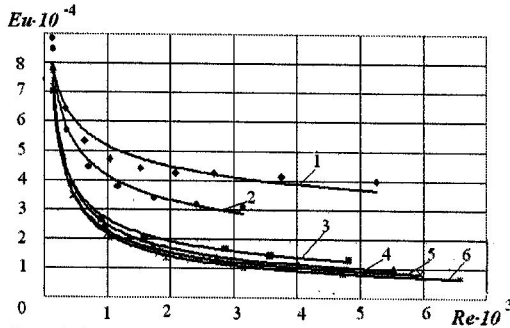


Рис. 3. Залежність критерію *Eu* від *Re* в каналі для співвідношення довжини до діаметру каналу *l/d*: 1 – 1,67; 2 – 1,25; 3 – 0,83; 4 – 0,67; 5 – 0,5; 6 – 0,33

Нами встановлена функціональна залежність між критеріями *Eu* і *Re* в явному вигляді для потоку газонаповненого тіста в циліндричному каналі. Ця залежність носить степеневий характер:

$$Eu = 2321 Re^n \left(\frac{l}{d} \right)^{2,4}, \quad (11)$$

де показник степеня *n* є функцією співвідношення довжини каналу до його діаметру

$$n = \frac{l}{3d} - 0,75. \quad (12)$$

У разі, коли співвідношення довжини до діаметру менше одиниці (криві 3, 4, 5, 6 на рис. 3), можна стверджувати, що вказаний параметр практично не впливає на залежність між критеріями Eu і Re .

Нами розраховано значення критерію Eu в каналі та на виході з останнього (рис.4).

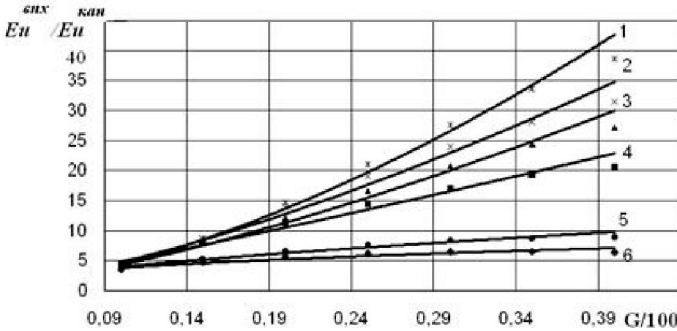


Рис. 4. Залежність відношення значень критерію Eu на виході з каналу до Eu в каналі з урахуванням вмісту газової фази при співвідношенні довжини каналу до діаметру (l/d):

1 – 0,33; 2 – 0,5; 3 – 0,67; 4 – 0,83; 5 – 1,25; 6 – 1,67

Для потоку газонаповненої рідини у разі виділення газової фази у вільному стані спостерігається збільшення значень критерію Eu , а відношення зазначених критеріїв на вході в канал та на виході з нього більше 1. При цьому значення відношення $Eu^{вих}$ до $Eu^{кан}$ тим більше, чим коротший канал. Це пояснює отримані нами експериментальні дані, що у разі течії газонаповненого тіста довжина каналу має бути мінімальною для забезпечення найбільшого коефіцієнта розширення екструдату.

В результаті встановлених співвідношень між значеннями критерію Eu в каналі та виході з нього отримали показник, що дозволяє враховувати вплив газової фази на ефективність процесу екструдування дріжджового тіста, наповненого вуглекислим газом:

$$K_G = \frac{Eu^{вих}}{Eu^{кан}} = 33,3 \left(\frac{l}{d} \right)^{-1,9} \left(\frac{G}{100} \right)^{1,9-0,9 \frac{l}{d}}$$

На основі аналізу отриманих значень відношення критеріїв встановлено, що з метою найбільш ефективного використання газової складової під час течії тіста в каналі співвідношення довжини до діаметру має бути менше 1. При цьому величина відношення $Eu^{вих}$ до $Eu^{кан}$ змінюється в межах від 20 до 45 для максимального вмісту газової фази.

Висновки. Отримані критеріальні залежності дозволяють узагальнити проведені експериментальні та теоретичні дослідження течії газонаповнених не'ютонівських матеріалів та сформулювати вимоги до конструкції формувальної матриці для екструзії газонаповненого тіста.

ЛІТЕРАТУРА

1. Теличкун Ю.С. Удосконалення процесу екструдування дріжджового тіста з метою створення високоефективного обладнання. Автореферат дисертації на здобуття наук. ступ. канд.техн. наук. — К.: НУХТ. — 2011р. — 24 с.
2. Yu. Telichkun The research of the gas-filled dough rheological characteristics / Yu. Telichkun, V. Telichkun, V. Taran, O. Gubenia, M. Desik. // EcoAgroTourism. — 2010. — N1. — P. 67 – 71.
3. ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л. Процессы и аппараты химической технологии: Учебник. В двух частях. // Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, А.П. ГОТЛИНСКАЯ, В.А. ЛЕЩЕНКО; под ред. Л.Л. ТОВАЖНЯНСКОГО. — Харьков: НТУ «ХПИ», 2004. — 632 с.

Одержана редколлегією 22.09.2011 р.