

УДК [532.5:62-23]:664

DOI: 10.31388/2078-0877-19-2-110-116

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕЧІЇ В'ЯЗКО-ПЛАСТИЧНОЇ РІДИНИ ПО КАНАЛУ ФОРМУВАЧА ПРИ ОБ'ЄМНОМУ ДРУЦІ

Бойко В. С., к. т. н.,

Загорко Н. П., к. т. н.,

Тарасенко В. Г., к. т. н.

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

Тел. (0619) 42-13-06

Анотація – стаття присвячена експериментальному дослідженню течії в'язко-пластичної рідини через круглий капіляр сопла при об'ємному формуванні харчових продуктів, досліджені основні параметри, які впливають на процес течії, стан між напругою зсуву і швидкістю зсуву, що характеризує поведінку рідини при течії по каналу формувача.

Ключові слова – в'язкопластична рідина, формування, об'ємний друк, капіляр, екструдент.

Постановка проблеми. Технічний прогрес пред'являє вимоги перспективності, гнучкості, високої продуктивності до технологій виробництва харчових продуктів, до таких технологій відноситься об'ємний друк, що реалізується методом послідовного нанесення валками продукту з одночасним їх спіканням. Технологія об'ємного друку потребує високої точності здійснення процесу, тому потребує математичного забезпечення для розрахунку та оптимізації технологічних і експлуатаційних параметрів.

Аналіз останніх досліджень. 3D-друк разом з альтернативною енергетикою та біотехнологіями є невід'ємною частиною картини майбутнього. Вже сьогодні тривимірний друк стає важливою частиною нашого життя. 3D-принтер здатен створювати предмети методом пошарового нанесення речовини на моделі, які створені 3D-редактором. Технологія об'ємного друку вживається у багатьох сферах: у будівництві, в аерокосмічній галузі, в медицині, в харчовій промисловості тощо.

Постановка завдання. Метою даної роботи є аналіз процесу течії в'язко-пластичної рідини по каналу формувача. Для проведення досліджень витікання в'язко-пластичного продукту з наконечника (сопла) головки об'ємного формувача була розроблена і виготовлена експериментальна установка (прототип головки формувача зі змінними

накінечниками). Визначено параметри течії в'язко-пластичної рідини при об'ємному формуванні харчових продуктів [1, 2].

Основна частина. Перебіг в'язко-пластичної рідини через круглий капіляр сопла формувача реалізується внаслідок різниці тисків на вході в капілярний канал і на виході з нього. При цьому має місце параболічний розподіл швидкостей шарів в радіальному напрямку всередині потоку рідини.

У зв'язку з тим, що в'язко-пластичні рідини найчастіше мають значну в'язкість, для них характерний ламінарний рух, навіть при відносно великих перепадах.

Для практичних розрахунків параметрів, в'язко-пластичного продукту, в які входять складові, отримані експериментальним шляхом, пропонується наступний алгоритм розрахунку.

До числа в'язко-пластичних рідин відносяться: хлібопекарське і макаронне тісто, кондитерські маси, фарші, пасти, пюре, різні креми та інші продукти, сировина і напівфабрикати [3]. Рух неньютонівських рідин має місце при їх нагнітанні шнеками, валками, плунжерами, шестеренними насосами, транспортуванні по каналах різного профілю, довжини і діаметру.

Апарат для об'ємного друку, як правило, працює на принципі екструзії. Він складається з блоку управління з керуючою програмою, керуючим роботом. За алгоритмом програми блок подає команди до електроприводу столу і формувачу в трьох ступенях свободи, екструдера з формуючою головкою і компресора, що створює тиск в екструдері (рис. 1).

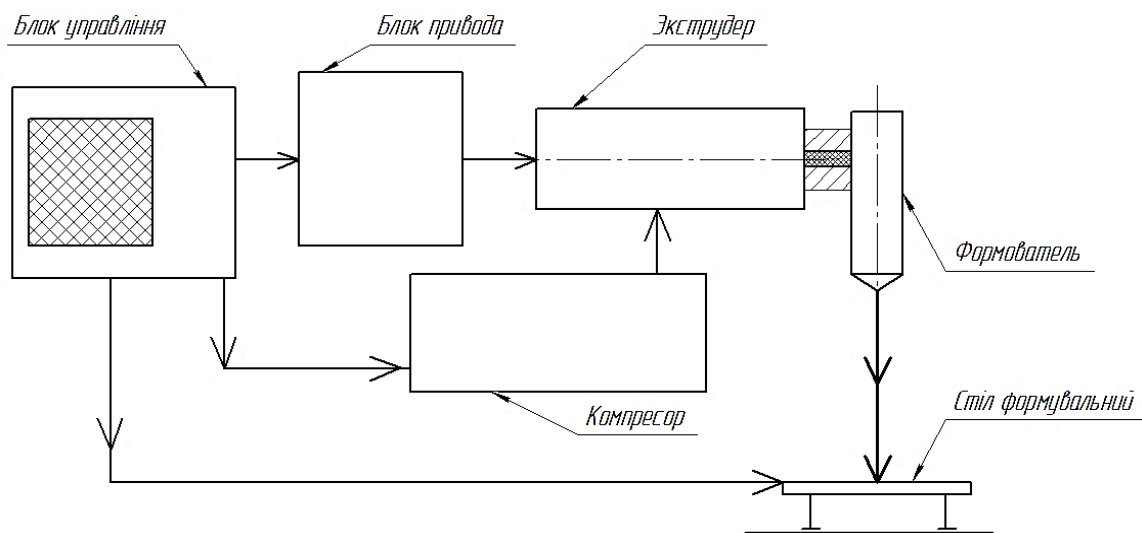


Рис. 1. Схема апарату для об'ємного друку харчових виробів.

Одним з основних приладів апарату є формуюча головка, від якої залежить товщина валка, який укладається, швидкість руху столу, продуктивність апарату.

Для конструювання формуючої головки треба експериментально визначити деякі параметри в'язко-пластичної рідини, яка буде використана в якості сировини. Ці параметри визначаються за допомогою експериментальної формуючої головки з плоскими або круглими каналами. Схема експериментальної головки з щілинним і круглим капіляром представлена на (рис. 2).

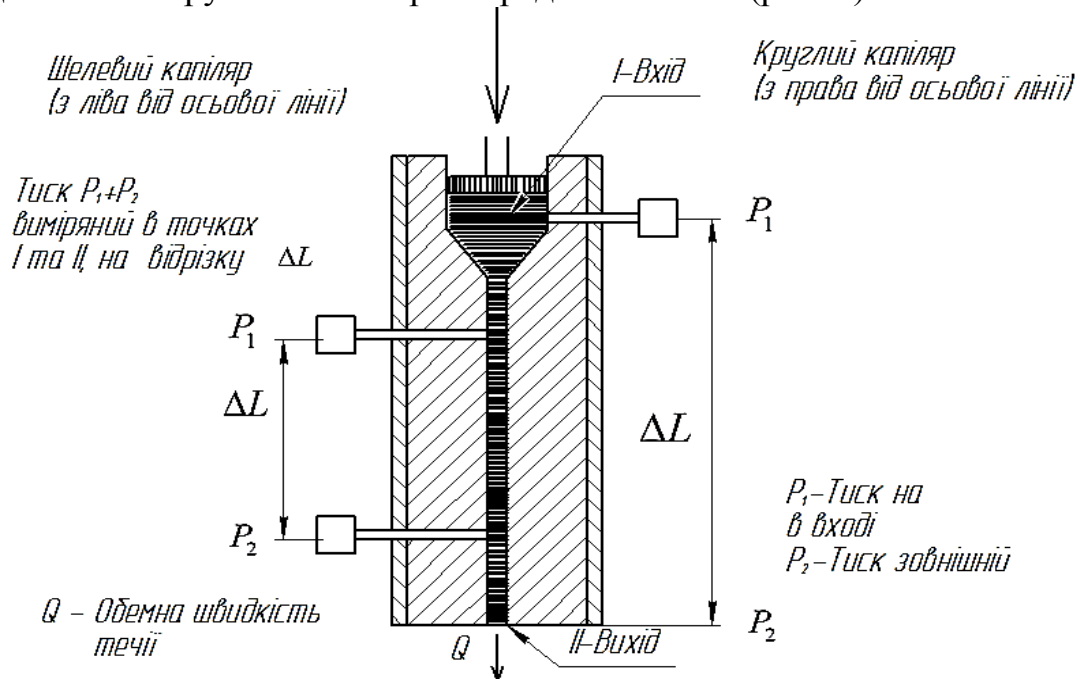


Рис. 2. Схема капілярного наконечника формувальної головки.

Рідина продавлюється через щілинний капіляр плунжером, екструдером або іншими джерелами тиску з постійною або програмованою (змінною) швидкістю течії. Датчики тиску розташовані по довжині капіляра на відстані ΔL і, як правило, знаходяться досить далеко як від входу в капіляр так і від виходу. Два датчика тиску вимірюють перепад тисків.

$$\Delta P = P_1 - P_2, \text{ Па}, \quad (1)$$

де P_1 і P_2 – тиск, виміряний в точках I і II, розділених відстанню ΔL , Па.

Конструкція формуючої головки ідентична пристрою реометра з круглими капілярами діаметром від 1 до 4 мм.

При експериментальних дослідженнях з круглими каналами відповідна різниця тисків не може бути визначена всередині каналу. У цьому випадку оцінюють різницю між тиском у резервуарі при вході в канал і навколишнім тиском при виході з наконечника формуючої головки.

Швидкість течії рідини Q (см³/хв) задається швидкістю поступального руху плунжера або частотою обертання приводу дозуючого насоса. Величину Q можна розрахувати наступним чином: зважити екструдент, що витік з капіляра за певний проміжок часу, потім за відомою масою і щільністю знайти швидкість течії.

$$Q = \frac{M}{\rho \cdot t} \text{ (см}^3\text{/хв)}, \quad (2)$$

де M – маса екструдента, кг; ρ – щільність екструдента, кг/см³;
 t – час процесу, с.

Теоретичним шляхом швидкість екструзії Q можна розрахувати, попередньо дослідним шляхом визначити в'язкість μ , різницю тисків ΔP і довжину каналу L за рівнянням.

$$Q = \frac{\pi R^4 \cdot \Delta P}{8 \mu \cdot L}. \quad (3)$$

Розрахувавши теоретично об'ємну витрату рідини Q , можна розрахувати основні показники руху в'язко-пластичної рідини в каналах круглого і щілинного перетину – швидкість зсуву, напругу зсуву, а також в'язкість використовуваного матеріалу.

Необхідно встановити, що параметри в'язко-пластичних рідин, на відміну від ньютонівських рідин (де вони носять лінійний характер) виражаються складними залежностями [4]. Тому для в'язко-пластичних рідин використовується поняття про уявну в'язкість. Під уявною в'язкістю μ розуміють в'язкість такої ньютонівської рідини, швидкість деформації якої під дією заданої напруги зсуву дорівнює швидкості деформації даної в'язко-пластичної рідини [5].

Поправка Беглі. Дослідні дані, отримані на експериментальній установці, потребують коригування, що пов'язано з ефектом входу і виходу матеріалу в круглий канал, який негативно впливає на перепад тисків по довжині каналу, пов'язаний з в'язкістю пластичних продуктів.

Беглі запропонував метод визначення цих поправок, який полягає в тому, що випробування даного матеріалу призводять з декількома капілярами одного і того ж діаметру D , але різної довжини L .

Крім відношення довжини капіляра до діаметру (L/D), наприклад 10, 30, 40, всі інші умови вимірювання ідентичні.

Якщо відкладати значення ΔP при фіксованій швидкості зсуву $\dot{\gamma} = Const$ в залежності від L/D , отримані при вимірюванні з декількома капілярами різної довжини, можна отримати цілий ряд прямих (рис. 2). Ці прямі можуть бути екстрапольовані (продовжені) до перетину з віссю ординат при ΔP_c . Це падіння тиску відноситься до вхідного ефекту для капіляра з довжиною $L=0$. Можна екстрапольовати прямі $\Delta P(L/D)$ і ще далі - до перетину з віссю абсцис.

При цьому отримаємо негативні значення ΔL , які будуть додані до дійсної довжини капіляра L , далі буде перепад тиску, еквівалентний вхідному ефекту.

Тоді внесення поправки в напругу зсуву означає або віднімання ΔP_c з виміряної величини падіння тиску ΔP , або додавання уявної додаткової довжини ΔL до довжини капіляра.

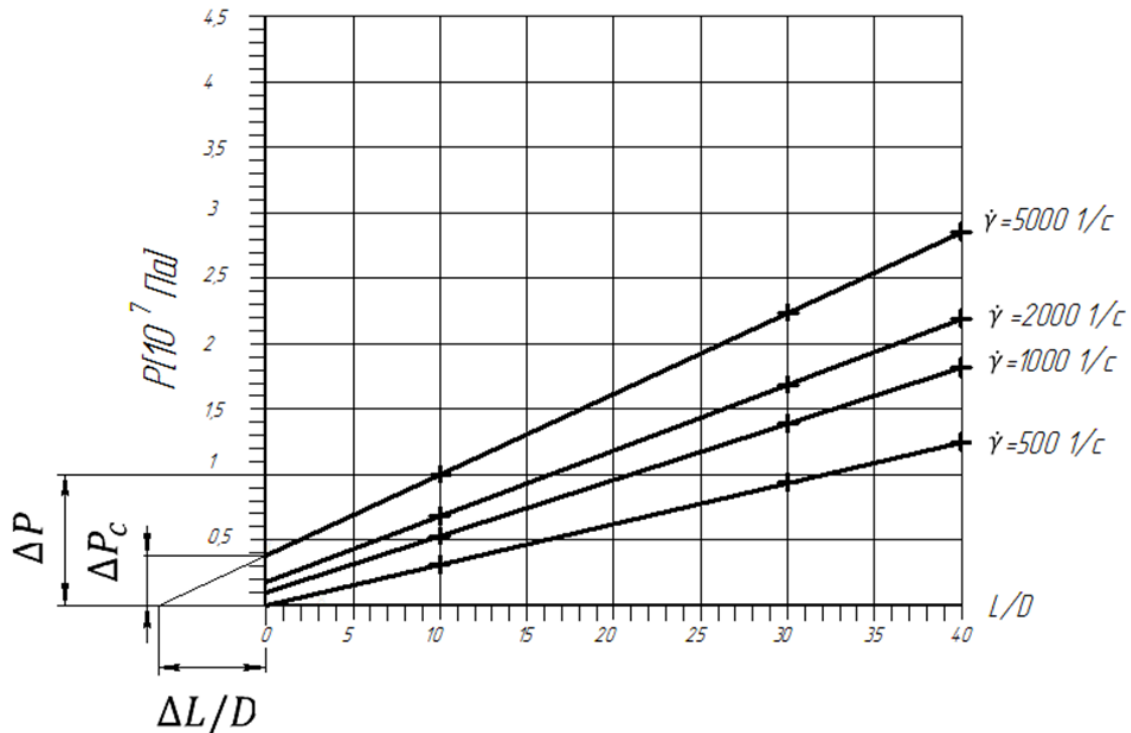


Рис. 3. Діаграма Беглі для визначення вхідних ефектів за експериментальними даними для круглих капілярів.

Таким чином, скоригована величина напруги зсуву може бути розрахована за співвідношенням:

$$\tau_{\text{кор}} = (\Delta P - \Delta P_c) \cdot \frac{R}{2L}. \quad (4)$$

$$\tau_{\text{кор}} = \frac{R}{2(L + \Delta L)}.$$

Поправка Вайссенберга-Рабіновича. При випробуванні неньютонівських рідин, як для круглих, так і для плоских капілярів, необхідно введення поправки, пов'язаної з природою рідини, що випробовується.

Після математичної обробки рівнянь швидкості течії в'язкопластичного продукту при екструзії і уявній швидкості зсуву було отримано: скориговані рівняння істинної швидкості зсуву $\gamma_{\text{іст}}$ для випадку круглих капілярів шляхом введення поправки Вайссенберга "S".

$$\gamma_{\text{іст}} = \frac{\gamma}{4} (3 + S), \quad (5)$$

де $\gamma_{\text{іст}}$ – справжня (скоригована) швидкість зсуву для в'язко-пластичних рідин; $\gamma_{\text{к.с.}}$ – здається швидкість зсуву для неньюновської рідини; S – поправка Вайсенберга.

Поправка Вайсенберга "S" отримана диференціюванням залежності швидкості зсуву від напруги зсуву, побудованої в подвійних логарифмічних координатах:

$$S = \frac{d \lg \gamma_{\text{к.с.}}}{d \lg \tau} = \text{tg} \alpha. \quad (6)$$

Диференціалом логарифмічної кривої є нахил кривої при даній уявній величині швидкості зсуву. Для в'язко-пластичних рідин тангенс кута нахилу кривої завжди буде більше 1. Це означає, що для таких рідин справжня швидкість зсуву завжди буде більше, ніж здається.

Висновки. В результаті проведеного аналізу існуючих технологій об'ємного друку різних матеріалів (стереолітографія, лазерне спікання порошкових матеріалів, пошаровий друк розплавленою полімерною ниткою, струменевим моделюванням, склеюванням порошкових матеріалів, ламінуванням листових матеріалів), було встановлено, що дані технології застосовуються в різних виробничих сферах промисловості (будівельній, машинобудівній, медичній, харчовій, космічній, робототехнічній тощо). Однак, не всі розробки можуть бути використані в харчовому виробництві. Найбільш застосовна технологія пошарового друку харчових продуктів за допомогою принтера і об'ємного формувача.

Література:

1. *Бойко В. С.* Теоретичне обґрунтування течії в'язко-пластичної рідини по каналу формувача при об'ємному друці (3D) // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Мелітополь, 2017. Вип. 17, т. 1. С. 119-124.

2. *Бойко В. С., Тарасенко В. Г., Муравйов А. М.* Визначення параметрів течії в'язко-пластичної рідини при об'ємному формуванні харчових продуктів // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Мелітополь, 2018. Вип. 18, т. 1. С. 318-325.

3. *Рейнер М.* Реология. Москва: Колос, 1965. 410 с.

4. *Уилкинсон У. Л.* Неньютоновские жидкости: Гидромеханика, перемешивание и теплообмен / пер. с англ. З. П. Шульмана. Москва: Мир, 1964. 520 с.

5. *Мачихин Ю. А., Мачихин С. А.* Инженерная реология пищевых материалов. Москва: Легкая и пищевая промышленность, 1987. 465 с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКО-ПЛАСТИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ ПО КАНАЛУ ФОРМОВАТЕЛЯ ПРИ ОБЪЕМНОЙ ПЕЧАТИ

Бойко В. С., Загорко Н. П., Тарасенко В. Г.

Аннотация – статья посвящена экспериментальному исследованию течения вязко-пластической жидкости через круглый капилляр сопла при объемном формировании пищевых продуктов, исследованы основные параметры, влияющие на процесс течения, состояние между напряжением смещения и скоростью сдвига, которое характеризует поведение жидкости при течении по каналу формователя.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE FLOW OF VISCO-PLASTIC LIQUID ON THE CHANNEL OF THE FORMER AT THE VOLUME PRINT

V. Boiko, N. Zahorko, V. Tarasenko

Summary

The article is devoted to an experimental study of the flow of a viscous-plastic fluid through a circular nozzle capillary during volumetric formation of food products. The main parameters affecting the flow process, the state between the bias voltage and shear rate, which characterizes the behavior of the fluid during flow through the former.

Technical progress demands the promise, flexibility, and high productivity of food production technologies; such technologies include volumetric printing, which is realized by the method of successive application of rolls of the product with their simultaneous sintering. The technology of volume printing requires high accuracy of the process, therefore, requires mathematical support for the calculation and optimization of technological and operational parameters.

3D printing, along with alternative energy and biotechnology, is an integral part of the future picture. Today, three-dimensional printing becomes an important part of our lives. The 3D printer is capable of creating objects by layer-by-layer method on models that are created by a 3D editor. The technology of volume printing is used in many areas: in construction, in the aerospace industry, in medicine, in the food industry, and so on.

As a result of the analysis of existing technologies of volume printing of various materials, it was established that these technologies are used in various industrial spheres of industry (construction, engineering, medical, food, space, robotics, etc.). However, not all developments can be used in food production. The most applicable technology of layer printing of food products, with the help of a printer and a volume former.