

УДК [532.5:62.23]:663

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕЧІЇ В'ЯЗКО-ПЛАСТИЧНОЇ РІДИНИ ПРИ ОБ'ЄМНОМУ ФОРМУВАННІ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

Бойко В.С., к.т.н.,

Тарасенко В.Г., к.т.н.,

Муравйов А.М., магістр

Таврійський державний агротехнологічний університет

Тел. (0619) 42-13-06

Анотація - стаття присвячена визначенню параметрів течії в'язко-пластичної рідини при об'ємному формуванні харчових продуктів на основі експериментальних досліджень.

Ключові слова - формування, об'ємний друк, швидкість витікання, динамічна в'язкість, об'ємна витрата

Постановка проблеми. Технологія виробництва харчових продуктів у теперішній час повинна відповідати вимогам перспективності, гручкості, високої продуктивності, як того потребує технічний прогрес. Прикладом такої технології є об'ємний друк (3D), який виконується методом послідовного нанесення валками продукту з одночасним їх спіканням при управлінні процесом за допомогою спеціальної комп'ютерної програми.

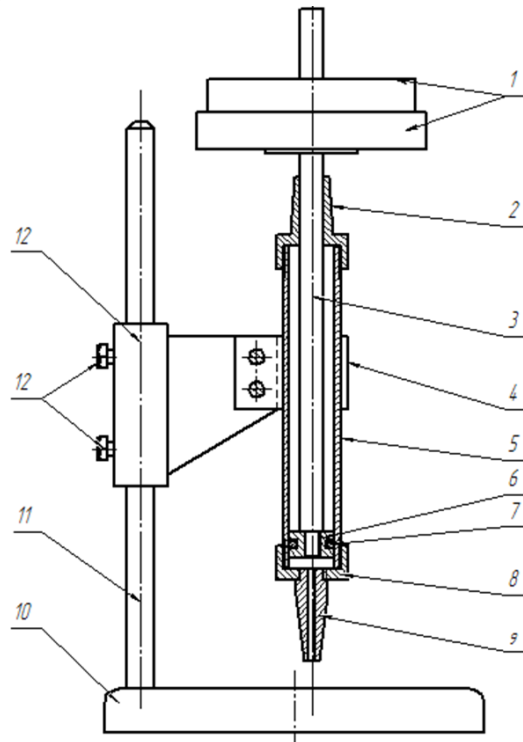
Вищезгадана технологія вимагає високої точності виконання процесу. Через це процес об'ємного друку харчових продуктів повинен мати добре математичне забезпечення для розрахунку та оптимізації технологічних і експлуатаційних параметрів.

Аналіз останніх досліджень. Процес об'ємного друку харчових продуктів та його передумови вивчалися багатьма вченими [1-5]. Технологія об'ємного друку продукту впевнено завоювала місце у виробництві продуктових виробів.

Основна частина. 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 наконечниками).

Конструкція установки складається з циліндра, виконаного з нержавіючої сталі. Зверху циліндр закритий кришкою з отвором, яка направляє шток поршня. Напрямна потрібна для того, щоб уникнути перекосу штоку, а разом з ним і поршня при русі його в циліндрі. Знизу циліндр закритий нижньою кришкою. Верхня і нижня кришки

виготовлені з бронзи і встановлюються на циліндр за допомогою різьби (рисунк 1).



1 - гирі; 2 - напрямна кришка; 3 - шток; 4 - кронштейн; 5 - циліндр; 6 - поршень; 7 - кільце ущільнювача; 8 - кришка наконечника; 9 - наконечник з каналом; 10 - плита штатива; 11 - направляюча кронштейна; 12 - фіксуючі болти; 12 - кронштейн.

Рис. 1. Експериментальна установка для дослідження параметрів витікання в'язко-пластичного продукту.

Нижня кришка циліндра має отвір для гвинта для установки капілярного наконечника. Проведення експериментальних досліджень виконуються трьома капілярними наконечниками, які мають діаметр 2, 3, 4 мм. У направляючій верхньої кришки циліндра рухається шток, у нижній частині якого закріплений алюмінієвий поршень з поліуретановим кільцем ущільнювача. На верхній частині штока закріплена опорна шайба, на яку встановлюються спеціальні вантажі з метою створення поршнем тиску на в'язко-пластичний продукт. Для закінчення витікання його через капілярний канал наконечника експериментальної головки формувача. Експериментальна головка формувача за допомогою хомута кріпиться до кронштейну повзуна. Втулку повзуна можна пересувати по стійці нерухомого столу і фіксувати певне положення двома болтами М6.

Визначення швидкості витікання продукту з каналу головки формувача задається поступальним рухом поршня. Величина Q розраховується за наступним виразом

$$Q = \frac{M_{\text{пр}}}{\rho \cdot t} \quad (1)$$

де Q - швидкість вильоту продукту, $\text{см}^3 / \text{хв}$;

ρ - щільність продукту, $\text{кг} / \text{см}^3$;

t - час дослідження, с;

$M_{\text{пр}}$ - маса продукту, кг.

Отримані розрахункові дані заносяться у таблицю 1.

Таблиця 1 - Розрахункові параметри процесу витікання продукту (щільність продукту $\rho = 850 \text{ кг/см}^3$; $d_1=2\text{мм}$, $d_2=3\text{мм}$, $d_3=4\text{мм}$ - діаметри каналів наконечників).

Номер досліду			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Навантаження на шток	G		1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5
	H											
Тиск на продукт	P_1 Па		320	477	636	796	955	1115	1273	1433	1592	1751
$d_1=2\text{мм}$	Маса продукту	$M_{\text{пр}}$ кг	0,061	0,100	0,101	0,099	0,102	0,103	0,100	0,104	0,100	0,102
	Час досліду	t , с	198	257	246	200	154	110	94,6	77	63,8	57,2
	Швидкість витікання продукту	Q_1 $\text{см}^3/\text{с}$	220	277	273	353	473	668	759	964	1133	1278
$d_2=3\text{мм}$	Маса продукту	$M_{\text{пр}}$ кг	0,054	0,091	0,101	0,098	0,101	0,103	0,102	0,103	0,101	0,102
	Час досліду	t с	90	117	120	91	60	50	43	35	89	26
	Швидкість витікання продукту	Q_2 $\text{см}^3/\text{с}$	55	601	769	1202	1471	1694	2102	2487	2802	
$d_3=4\text{мм}$	Маса продукту	$M_{\text{пр}}$ кг	0,072	0,105	0,102	0,100	0,104	0,104	0,099	0,106	0,103	0,105
	Час досліду	t с	50	65	66,6	50,5	39	27,7	23,8	19,4	16	14
	Швидкість витікання продукту	Q_3 $\text{см}^3/\text{с}$	710	1153	1103	1428	1904	2751	3074	3984	4598	5357

Тиск на поверхню продукту створюється поршнем за рахунок навантаження на шток і визначається за формулою

$$P = \frac{G}{\pi D^2 / 4} = \frac{4G}{\pi D^2}, \quad (2)$$

де P - тиск на продукт, Па;

G - навантаження на шток поршня, Н;

D - діаметр поршня, м.

На підставі експериментальних і розрахункових даних будується графік залежності швидкості витікання продукту Q від тиску на продукт P .

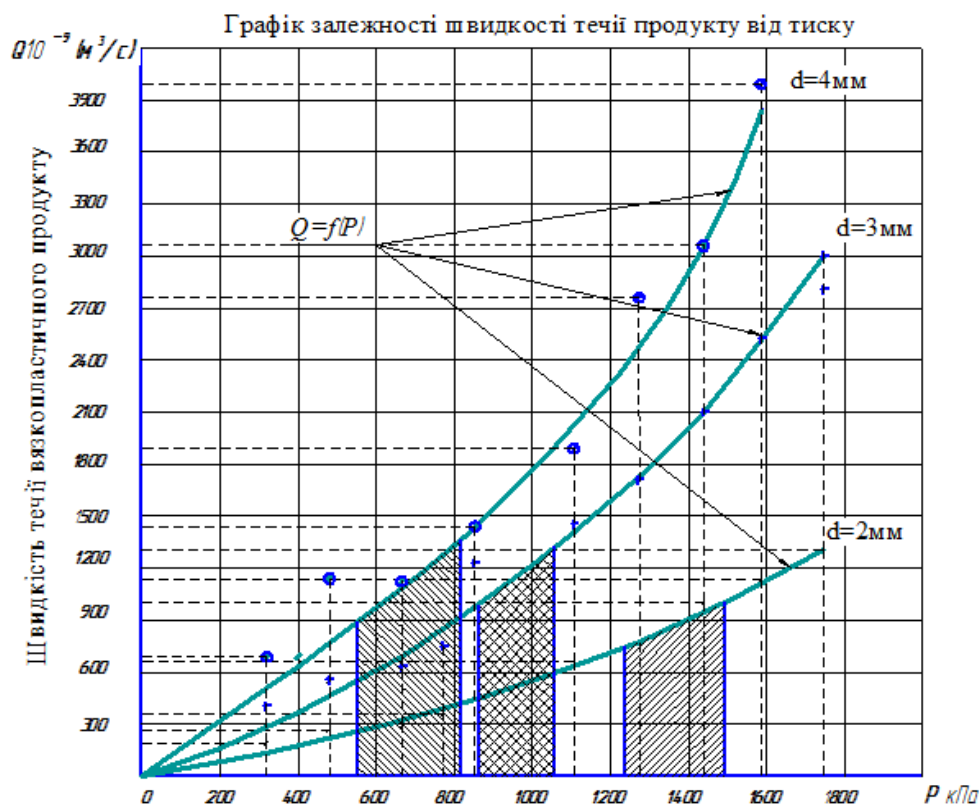


Рис. 2. Графік залежності швидкості витікання продукту Q від тиску P , $Q = f(P)$.

Аналізуючи криві залежності $Q = f(P)$ і порівнюючи їх з характеристиками вже існуючих на виробництві апаратів (наприклад об'ємний формувач шоколадних цукерок, пряників і печива складної форми), можна виділити на графіку робочі зони А, Б, і С, які максимально відповідають високій продуктивності і економічній ефективності реального промислового принтера для об'ємного друку продуктів.

Визначення геометричних параметрів валка в'язкопластичного продукту в залежності від лінійної швидкості руху столу, а також побудова графіків залежності висоти і ширини валка від лінійної швидкості руху столу виконується на підставі експериментальних даних.

Таким чином, у залежності від технології виготовлення продукту і конструкції апарату можна підібрати необхідну висоту і ширину укладача валка в залежності від використовуваного продукту, його обсягу або маси і необхідної продуктивності.

Основними параметрами, які характеризують витікання в'язкопластичного продукту, є напруга зсуву τ , швидкість зсуву $\dot{\gamma}$ продукту.

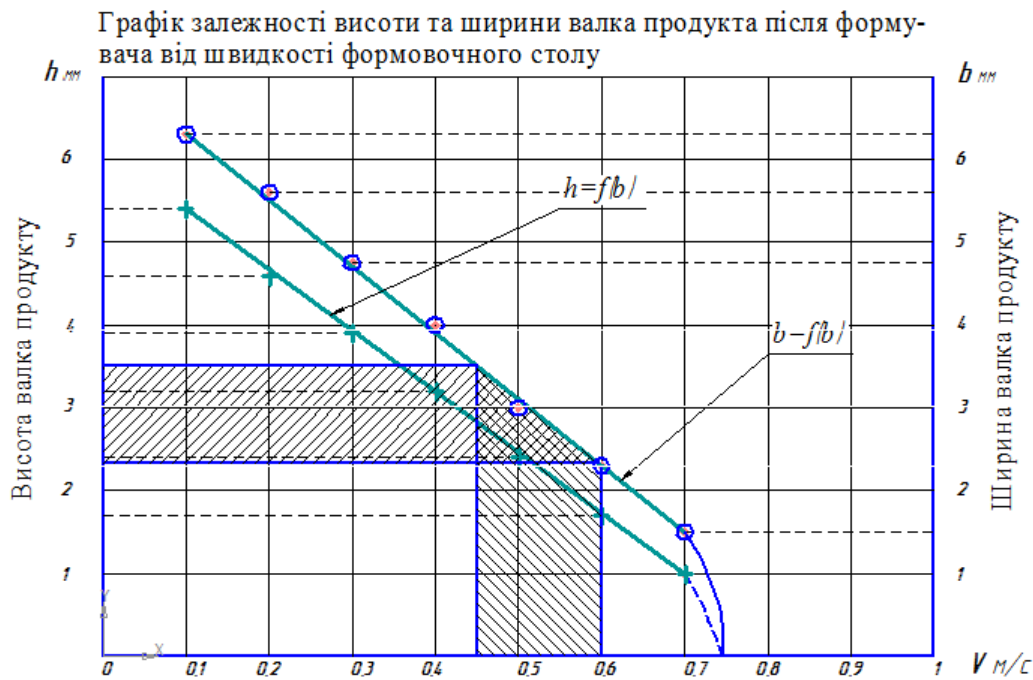


Рис. 3. Графіки залежності: а) висоти валка від лінійної швидкості руху столу, $h = f(v)$; б) ширини валка від лінійної швидкості руху столу, $b = f(v)$.

Напряга зсуву визначається за наступною формулою

$$\tau_R = \left(\frac{R}{2\Delta L} \right) \cdot \Delta P; \text{ (Па)}, \quad (3)$$

де R - внутрішній радіус каналу наконечника формувача, м;
 ΔL - довжина каналу наконечника формувача, м;
 ΔP - перепад тисків між початком і кінцем каналу, Па.

$$\Delta P = P_1 - P_2, \quad (4)$$

де P_1 та P_2 - показники датчиків тиску в точках 1 і 2, розділених відстанню ΔL , Па.

Однак, як вже було зазначено раніше, поки що немає настільки малих датчиків, щоб вони могли бути вмонтовані в невеликі круглі канали. У цьому випадку оцінюється різниця між тиском в циліндрі під поршнем (див. таблицю 1) і навколишнім тиском при виході продукту з наконечника формувача. Швидкість зсуву є другим важливим показником, який характеризує витікання в'язкопластичного продукту.

Швидкість витікання продукту визначається за формулою

$$\gamma_R = \frac{4}{\pi \cdot R^3} \cdot Q, \text{ (с}^{-1}\text{)}, \quad (5)$$

де γ_R - швидкість витікання продукту, $\text{см}^3 / \text{с}$.

Значення швидкості витікання продукту приймаємо по таблиці 1. Отримані розрахункові дані заносимо в таблицю 2.

Таблиця 2 - Параметри, які характеризують витікання в'язкопластичної рідини.

Номер досліду		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Різниця тиску	ΔP кПа	219	376	535	695	854	1014	1172	1332	1491	1650
Швидкість витікання продукту	$Q \cdot 10^9$ м ³ /с	1128	555	601	769	1202	1471	1694	2102	2484	2802
Напруга зсуву 10^6	$\tau_R \cdot 10^{-6}$	11	15,12	17,5	21	30,61	34,66	36	37,5	38	37
Швидкість зсуву	$\gamma_R \cdot 10^9$ с ⁻¹	162	210	228	292	457	559	643	798	945	1064
В'язкість продукту	μ мПа	68	72,5	77	72,5	67,7	62	56	47,5	34	32

На підставі розрахункових даних, наведених у таблиці 2, визначаємо в'язкість продукту за наступною формулою:

$$\mu = \frac{\tau_R}{\gamma_R} = \frac{\pi R^4}{8 \Delta L \cdot Q}, \quad (\text{Па} \cdot \text{с}). \quad (6)$$

Таким чином, за результатами експериментальних досліджень і теоретичних розрахунків параметрів, що характеризують витікання в'язкопластичного продукту, представлених у таблиці 2, будується графік залежності $\tau = f(\gamma)$. Аналогічно будуються криві залежності в'язкості від швидкості зсуву.

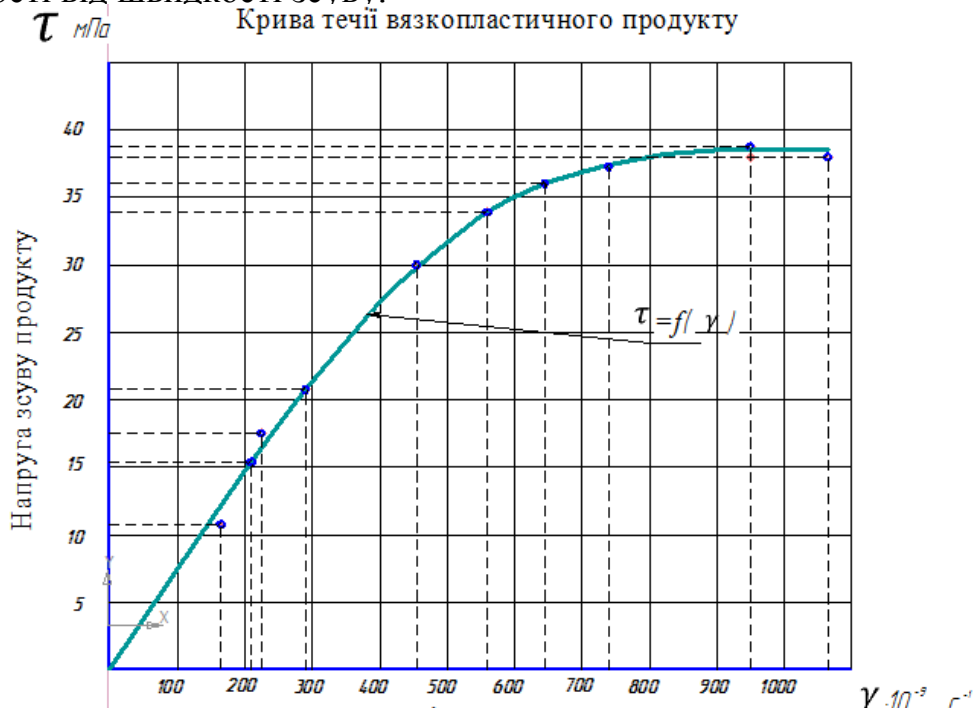


Рис. 4. Крива витікання в'язкопластичного матеріалу $\tau = f(\gamma)$.

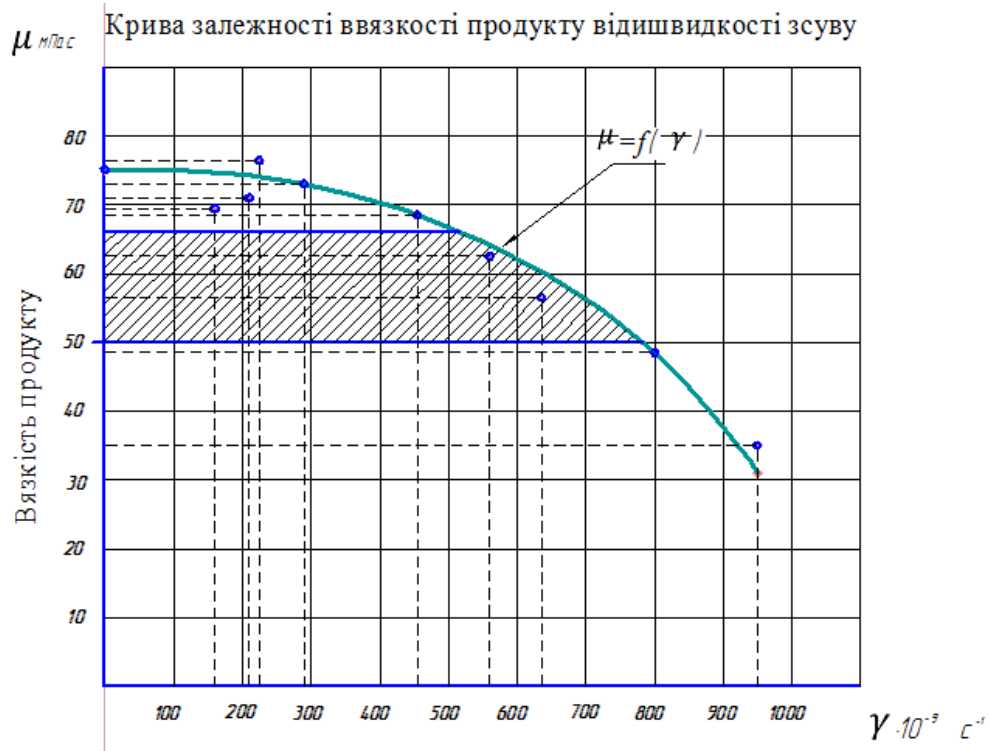


Рис. 5. Крива залежності в'язкості продукту від швидкості зсуву.

Висновки. Аналізуючи отримані графіки потрібно відзначити, що крива течії в'язкопластичного матеріалу $\tau = f(\gamma)$ в початковий період різко зростає зі збільшенням швидкості зсуву. Потім, починаючи з деяких значень γ , напруга зсуву починає стабілізуватися (вирівнюватися). Це говорить про те, що бажано, щоб необхідні параметри технологічного процесу перебували в зоні стабілізації кривої.

В'язкість пластичного продукту зі збільшенням швидкості зсуву спочатку незначно знижується. При подальшому збільшенні швидкості зсуву значення в'язкості починають зменшуватися і в'язкопластичний продукт за своїми властивостями наближається до неньютоновської рідини. Щоб зберегти властивості в'язкопластичного продукту, потрібно, щоб в'язкість продукту і швидкість витікання були збалансовані і відповідали продуктивності апарата.

Література:

1. Шрамм, Г. Основы практической реологии и реометрии / Г. Шрамм. М.: Колос, 2003. – 312 с.
2. Вулис, Л.А. Теория струй вязкой жидкости / Л.А. Вулис, В.П. Кашкаров. М.: Наука, 1965. – 431 с.
3. Астарита, Дж. Основы гидромеханики неньютоновских жидкостей / Дж. Астарита, Дж. Маруччи. - М.: Мир, 1978. – 309 с.
4. Мачихин, Ю.А. Инженерная реология пищевых материалов / Ю.А. Мачихин, С.А. Мачихин. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 212 с.

5. *Рогов, И.В.* Физические методы обработки пищевых продуктов / И.В. Рогов. М.: Пищевая промышленность, 2004. –582 с.

6. Процеси і апарати харчових виробництв: лабораторний практикум / Під ред. І. Ф. Малежик ; Український держ. ун-т харчових технологій. - К.;, 1997. - 276 с.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕЧЕНИЯ
ВЯЗКО-ПЛАСТИЧНОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ ОБЪЕМНОМ
ФОРМИРОВАНИИ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ**

Бойко В.С., Тарасенко В.Г., Муравьев А.Н.

Аннотация - статья посвящена определению параметров течения вязко-пластической жидкости при объемном формировании пищевых продуктов.

**DETERMINATION PARAMETERS VISCOUS-PLASTIC
LIQUID FOR VOLUME FORMATION OF POWER FOOD
PRODUCTS**

V. Boiko, V. Tarasenko, A. Muravjov

Summary

In this work is considered the determination of the flow parameters of a viscous-plastic fluid in the volumetric formation of food products.