

## РОЗРОБКА МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ГЛИБИНИ РІЗА ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ ВИСОКОШВИДКІСНИМ СТРУМЕНЕМ ВОДИ

О. В. Гордієнко, кандидат технічних наук

Метод водорізання заснований на використанні кінетичної енергії рідини, що витікає під надвисоким тиском із сопла, що формує струмінь. Якщо звичайну воду стиснути під тиском до 1000 МПа, а потім пропустити через невеликий отвір діаметром від  $0,05 \cdot 10^{-3}$  до  $0,8 \cdot 10^{-3}$  м, то виникне потужний інструмент обробки матеріалів. Тонкий струмінь рідини, що тече зі швидкістю звуку з отвору малого діаметра, здатний впливати на оброблюваний матеріал із силою, достатньою для здійснення процесу мікрориву часток матеріалу від його основної маси, тобто надзвуковий струмінь рідини використовується як різальний інструмент. Обробка матеріалів надзвуковим струменем рідини має певну технологічність, а також більшу, порівняно із традиційними методами, продуктивність [1].

Дослідження процесу різання харчових продуктів високошвидкісним струменем води є досить складним теоретичним завданням [2]. Тому вивчення процесу різання харчових продуктів високошвидкісним струменем води необхідно проводити за допомогою експериментально-статистичного методу [3–5], що передбачає виконання серії експериментальних досліджень та графоаналітичний аналіз дослідних даних із застосуванням методів теорії ймовірностей і математичної статистики, а також методів теорії подоби й розмірностей.

Процес взаємодії струменя води з харчовим продуктом залежить від цілого ряду випадкових факторів, частина з яких просто неможливо врахувати. До основних з них відносяться: довжина циліндричної ділянки проточної частини струменеформуючої насадки  $l_{ц}$ , тиск води перед струменеформуючою насадкою  $P_0$ , швидкість витікання струменя води зі стру-

менеформуючої насадки  $\vartheta_0$ , діаметр отвору струменеформуючої насадки  $d_0$ , швидкість переміщення струменя води  $\vartheta_n$ , відстань між зрізом струменеформуючої насадки й поверхнею харчового продукту  $l_0$ , кількість проходів струменя води по харчовому продукту  $n$  і його фізико-механічні властивості [6].

Була проведена серія експериментальних досліджень впливу всіх цих факторів на глибину різання харчових продуктів [2, 7–9]. Однак відсутнє узагальнення цих досліджень, результатом яких має бути розрахункова залежність визначення глибини різання харчових продуктів високошвидкісним струменем води.

Мета статті – узагальнення проведених експериментальних досліджень і одержання розрахункової залежності для визначення глибини різання харчових продуктів з урахуванням значення їхніх фізико-механічних властивостей, довжини циліндричної ділянки проточної частини струменеформуючої насадки, а також гідравлічних і режимних параметрів високошвидкісного струменя води.

Як уже було встановлено, глибина різання продукту  $h$  залежить від цілого ряду факторів, основними з яких є: гранична напруга зрушення харчових продуктів, геометричні параметри струменеформуючого пристрою, гідравлічні параметри високошвидкісного струменя води й режимних параметрів процесу різання.

Отже, залежність між глибиною різання продукту й основних факторів можна представити таким чином:

$$h = f(\tau_0, n, \vartheta_n, \vartheta_0, P_0, d_0, l_0, l_{ц}), \quad (1)$$

де  $\tau_0$  – гранична напруга зрушення харчового продукту, кПа;

$n$  – кількість проходів високошвидкісного струменя по різі продукту;

$\vartheta_n$  – швидкість переміщення високошвидкісного струменя води, м/с;

$\vartheta_0$  – швидкість витікання високошвидкісного струменя води зі струменеформуючої насадки, м/с;

$P_0$  – тиск води перед струменеформуючою насадкою, Па;

$d_0$  – діаметр отвору струменеформуючої насадки, м;

$l_0$  – відстань між зрізом струменеформуючої насадки й харчовим продуктом, що ріжеться, м;

$l_{ц}$  – довжина циліндричної ділянки проточної частини струменеформуючої насадки, м.

Для складання рівняння процесу різання в безрозмірній критеріальній формі з метою скорочення змінних у рівнянні (1) скористаємося трьома теоремами подоби й моделювання [4, 5].

Відповідно до першої теореми подібні процеси (реальний і той, що моделюється) повинні мати деякі однакові сполучення параметрів. При моделюванні різання харчових продуктів високошвидкісним струменем води приймалися в увагу всі основні фактори, що впливають на реальний процес різання.

Друга теорема, відома за назвою  $\pi$ -теорема, функціонує в такий спосіб: «усяке рівняння, що зв'язує собою  $N$  фізичних величин, серед яких  $K$  величин мають незалежні розмірності, може бути перетворене в рівняння, що зв'язує  $N - K$  безрозмірних комплексів і симплексів, складених із цих величин» [4, 5]. Безрозмірні величини, знайдені відповідно до  $\pi$ -теореми, є критеріями подоби. З обліком сказаного перетворимо рівняння (1).

У рівнянні (1) є вісім величин, що характеризують процес різання, з яких у системі  $M - L - T$  (маса – довжина – час) можна вибрати три величини з незалежною розмірністю. Визначимо розмірності величин, що входять у формулу (1):

$$[h] = L; [d_0] = L; [l_0] = L; [\vartheta_0] = \frac{L}{T}; [\vartheta_n] = \frac{L}{T};$$

$$[P_0] = \frac{M \cdot L}{T^2 \cdot L^2} = \frac{M}{T^2 \cdot L}; [\tau_0] = \frac{M \cdot L}{T^2 \cdot L^2} = \frac{M}{T^2 \cdot L}. \quad (2)$$

Як основні величини з незалежними розмірностями приймемо  $P_0$ ,  $d_0$  і  $\vartheta_0$  їхньої розмірності в системі  $M - L - T$  перепишемо таким чином:

$$[P^0] = [M] [L]^{-1} [T]^{-2};$$

$$[d^0] = [M]^0 [L]^1 [T]^0;$$

$$[\vartheta_0] = [M]^0 [L]^1 [T]^{-1}.$$

Перевірка незалежності розмірностей, прийнятих за основні величини, вимагає, щоб визначник матриці розмірностей  $D$  не дорівнював нулю. Матриця розмірностей складається із трьох рядків, де кожний елемент рядка являє собою показник ступеня розмірності маси, довжини й часу відповідно, тобто величин, прийнятих за основні. У нашому випадку для величин  $P_0$ ,  $d_0$  і  $\vartheta_0$  визначник матриці розмірностей буде мати вигляд:

$$D = \begin{vmatrix} 1 & -1 & -2 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{vmatrix}$$

Унаслідок того, що визначник матриці розмірностей не дорівнює нулю, то розмірності величин  $P_0$ ,  $d_0$  і  $\vartheta_0$  є незалежними.

Відповідно до  $\pi$ -теореми рівняння процесу різання буде містити в собі п'ять критеріїв подоби  $\pi_i$  (де  $i = 1, 2, 3, 4$  і  $5$ ):

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5) \quad (3)$$

Визначення критеріїв подоби  $\pi_i$  здійснюється відповідно до вираження

$$\pi_i = \frac{K_i}{[P_0]^{\alpha_i} [d_0]^{\beta_i} [\vartheta_0]^{\gamma_i}}, \quad (4)$$

де  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  і  $\gamma_i$  – величини, що показують, який показник ступеня має та або інша розмірність, що входить у критерій подоби.

Використовуючи теорему про те, що, не змінюючи загального числа вхідних у рівнянні (1) величин, можна замінити будь-який критерій подоби його зворотною величиною або критерієм, складеним із замінного й будь-яких інших критеріїв, представимо критеріальне рівняння процесу різання харчових продуктів високошвидкісним струменем води в такому вигляді:

$$\frac{h}{d_0} = f\left(\frac{P_0}{\tau_0}, \frac{l_0}{l_{\text{ц}}}, \frac{g_n}{g_0}, n\right). \quad (5)$$

Тут і функція, і аргументи – безрозмірні величини.

Таким чином, функція представлена відповідно до  $\pi$ -теореми у вигляді співвідношень між п'ятьма комплексними величинами:  $\frac{h}{d_0}$ ,

$$\frac{l_0}{l_{\text{ц}}}, \frac{P_0}{\tau_0}, \frac{g_n}{g_0} \text{ і } n.$$

Кінцевою метою експериментальних досліджень щодо різання харчових продуктів

високошвидкісним струменем води було встановлення виду залежності (5).

Узагальнена формула для розрахунку глибини різа продукту, прорізуваного високошвидкісним струменем води, буде мати вигляд:

$$\frac{h}{d_0} = 6,49 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{P_0}{\tau_0}\right)^{1,568} \times \left(\frac{l_0}{l_{\text{ц}}}\right)^{-0,365} \cdot \left(\frac{g_n}{g_0}\right)^{0,647} \cdot n^{0,682}. \quad (6)$$

Множинний коефіцієнт кореляції для вираження (6) становить  $R = 0,9$ ; критерій Фішера –  $F = 174$ . Критичне значення критерію Фішера для залежності (6) при 5 % рівні значимості становить  $F_{0,05} = 1,29$ ; це підтверджує адекватність отриманої розрахункової залежності експериментальним даним. Значення коефіцієнтів у рівнянні витримують перевірку на значимість за критерієм Ст'юдента [4–5].

Рівняння (6) має границі застосовності відповідно до табл.

Таблиця

#### Діапазон зміни основних факторів при експериментальних дослідженнях з різання харчових продуктів високошвидкісним струменем води

Найменування параметра	Діапазон зміни факторів
Ті, що задані	
Тиск води – $P_0$ , $10^6$ Па	100–500
Діаметр отвору струменеформуючої насадки – $d_0$ , $10^3$ м	0,2–0,8
Відстань між зрізом струменеформуючої насадки й поверхнею харчового продукту, що ріжеться – $l_0$ , $10^{-3}$ м	2–200
Довжина циліндричної ділянки проточної частини струменеформуючої насадки – $l_{\text{ц}}$ , $10^{-3}$ м	1–5
Гранична напруга зрушення харчового продукту – $\tau_0$ , кПа	$1,12\text{--}4,3 \cdot 10^3$
Кількість проходів високошвидкісного струменя води по різі – $n$	1–10
Швидкість переміщення харчового продукту щодо високошвидкісного струменя води – $g_n$ , $10^{-3}$ м/с	1–50
Розрахункові	
Швидкість витікання високошвидкісного струменя води з насадки – $g_0$ , м/с	335–810

У табл. зазначені діапазони зміни основних факторів у ході експериментальних досліджень, значення яких були прийняті до уваги під час розробки методу розрахунку глибини

різа харчових продуктів високошвидкісним струменем води.

Узагальнений аналіз експериментальних даних з використанням методів теорії подоби

й розмірностей, а також методів теорії імовірностей і математичної статистики дозволили одержати розрахункову залежність у безрозмірних параметрах для визначення глибини різки харчових продуктів з урахуванням значення їхньої граничної напруги зрушення, довжини циліндричної ділянки проточної частини струменеформуючої насадки, а також гідравлічних і режимних параметрів високошвидкісного струменя води. Отримана розрахункова залежність має границі застосовності, що є найбільш практично значимими.

Перспективами подальших досліджень у даному напрямку є визначення оптимальних параметрів водорізного обладнання, що дозволить підвищити якість водорізання та його продуктивність.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Гордієнко О. В. Гідрорізання в харчовому виробництві / О. В. Гордієнко, А. В. Погребняк, С. О. Фоменко // Обладнання та технології харчових виробництв : темат. зб. наук. пр. – Донецьк : ДонНУЕТ, 2007. – Вип. 16. – С. 26–31.
2. Гордієнко О. В. Дослідження процесу водорізання харчових матеріалів і продуктів / О. В. Гордієнко, А. В. Погребняк // Обладнання та технології харчових виробництв : темат. зб. наук. пр. – Донецьк : ДонНУЕТ, 2008. – Вип. 18. – С. 280–287.
3. Гордиенко А. В. Метод изучения процесса резания пищевых продуктов высокоскоростными струями воды / А. В. Гордиенко, Р. В. Жданов, А. А. Куксин // Сучасні технології харчових виробництв : тези доп. I міжнар. конф. – Д. : ДНУ, 2009. – С. 6.
4. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул : учеб. [для студ. высш. учеб. завед.] / Е. Н. Львовский. – М. : Высшая школа, 1988. – 239 с.
5. Кассандрова О. Обработка результатов наблюдений / О. Кассандрова, В. Лебедев. – М. : Наука, 1970. – 104 с.
6. Гордиенко А. В. Основные параметры, влияющие на водорезание пищевых продуктов / А. В. Гордиенко // Актуальні проблеми харчування: технологія та обладнання, організація і економіка : VI Міжнар. наук.-техн. конф., Святогірськ, 2009 р. – Донецьк : ДонНУЕТ, 2009. – С. 4–6.
7. Заплетніков І. М. Експериментальне визначення впливу фізико-механічних властивостей харчових продуктів на процес їх водорізання / І. М. Заплетніков, О. В. Гордієнко, А. В. Погребняк // Науковий Вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького. – Львів, 2009. – Т. 11. – № 2 (41). – Ч. 5. – С. 38–42.
8. Гордієнко О. В. Вплив твердості заморожених харчових продуктів на параметри процесу водорізання та водорізного обладнання / О. В. Гордієнко, А. В. Погребняк // Обладнання та технології харчових виробництв : темат. зб. наук. пр. – Донецьк : ДонНУЕТ, 2009. – Вип. 20. – С. 148–153.
9. Гордиенко А. В. Влияние гидравлических параметров высокоскоростной струи воды на эффективность процесса водорезания пищевых продуктов / А. В. Гордиенко, А. В. Погребняк // Перспективы пищевых технологий : темат. зб. науч. тр. – О. : ОНАХТ, 2009. – Вип. 35. – Т. 2. – С. 134–137.