

**Синюк О.М.**Хмельницький національний університет,  
м. Хмельницький, Україна  
E-mail: synoleg@ukr.net**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ  
РУЙНУВАННЯ ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ ТА  
ПОЛІПРОПІЛЕНОВИХ ПЛІВОК**

УДК 678.023.5

Експериментально досліджено залежність питомої енергії утворення одиниці вільної поверхні перероблених поліетиленової та поліпропіленової плівок при різних значеннях конструкційних та технологічних параметрів валкового пристрою. Отримані в результаті апроксимації результатів досліджень рівняння дозволяють описати зміну питомої енергії утворення одиниці вільної поверхні при переробці поліпропіленових та поліетиленових плівок від конструктивних та технологічних параметрів пристрою із зубчастими валками, а саме від частоти обертання зубчастих валків та кроку зубців.

Дані залежності можуть використовуватись при розрахунках технологічних та конструкційних параметрів обладнання для переробки полімерних відходів легкої промисловості.

**Ключові слова:** відходи, полімер, валковий пристрій, експеримент, руйнування, питома енергія.

**Загальні положення**

В роботі [1] наведена методика проектування обладнання для переробки полімерних відходів, на основі якої була розроблена і виготовлена експериментальна установка, що представляє собою окремі вузли.

На першій стадії полімерний зразок пропускався між зубчастими валками, де він піддавався розтягуючим і стискаючим навантаженням.

На другій стадії обробки полімерний зразок з пластично ослабленою на першій стадії структурою пропускався між валками профілю Рело, де він піддавався навантаженням стиску та зсуву.

На третьому етапі зруйнований полімерний зразок оброблювався голкофрезою, де відбувалася повна його дезінтеграція на фракції необхідного розміру. Ефективність обладнання для переробки полімерних відходів легкої промисловості визначається витратами енергії, дисперсністю перероблених відходів та продуктивністю. Останній критерій ефективності перероблюючого пристрою має вагоме значення для промислового обладнання і може досліджуватися тільки на ньому. В даній дисертаційній роботі будемо досліджувати вплив конструкційних і технологічних параметрів експериментальної установки на витрати енергії та ступень дисперсності отриманого після переробки матеріалу.

Згідно із сучасними теоріями руйнування [2 - 4] процес деформації аморфно-кристалічних полімерних матеріалів, що розглядаються в даній роботі, полягає в тому, що під дією зовнішніх сил в найбільш слабких місцях полімерного матеріалу – в аморфних областях утворюються замкнуті або дрібні тріщини на поверхні матеріалу. Руйнування полімерного матеріалу відбувається в тому випадку, коли тріщини настільки збільшуються, що перетинають матеріал по всьому перерізу в одному або декількох напрямках. Під час руйнування структури полімерного зразка напруження у ньому перевищують граничне значення міцності на розрив прохідних фібрил, що займають аморфні області полімерного матеріалу, пружна деформація змінюється пластичною деформацією і відбувається руйнування.

Процеси руйнування полімерного матеріалу, як і будь-якого твердого тіла, пов'язані із значними витратами енергії на утворення нових поверхонь. Існуючі теорії процесу подрібнення [3] встановлюють залежність між енергією, що витрачається на руйнування тіла і результатом процесу подрібнення, тобто розміром вільної поверхні продукту переробки. Згідно цієї теорії робота (енергія), що витрачається на руйнування полімерного зразка, пропорційна поверхні кусків полімеру, що утворюються при переробці. Поверхня полімерного матеріалу з зруйнованою структурою  $S_K$  буде в десятки разів більша поверхні полімерного матеріалу до його переробки  $S_{II}$  :

$$\frac{S_K}{S_{II}} = \delta, \quad (1)$$

де  $\delta$  – ступень дисперсності переробленого полімерного матеріалу.

Окремий вузол запропонованого обладнання для переробки полімерних відходів легкої промисловості забезпечує обмежену ступень дисперсності, тому для досягнення більш високих значень цього показника процес подрібнення необхідно здійснювати в три стадії, використовуючи послідовно всі пристрої, що розроблені в рамках даної роботи, а саме пристрій із зубчастими валками, пристрій із валками профілю Рело і голкофрезований пристрій. Певні полімерні матеріали вимагають декількох проходів (повторень обробки) на певній стадії переробки.

На основі вищесказаного пропонується як контрольований параметр для експериментальних досліджень процесу переробки полімерного матеріалу вибрати питому енергію утворення одиниці вільної поверхні переробленого матеріалу.

Для визначення даного параметра будемо вимірювати потужність, що витрачається на пластичне ослаблення та руйнування полімерного зразка  $N$ , при різних значеннях конструкційних і технологічних параметрів кожного з трьох запропонованих пристроїв. Після вимірювання площі вільної поверхні подрібнених частин полімерного зразка  $S$  питому енергію утворення одиниці вільної поверхні переробленого полімерного матеріалу будемо визначати за таким виразом:

$$w = \frac{N - N_0}{S}, \quad (2)$$

де  $N$  – потужність, що витрачається на руйнування структури полімерного зразка;

$N_0$  – потужність, що витрачається на холосте обертання валків або голкофрези.

Вибір матеріалу зразка здійснювався виходячи з номенклатури полімерів, які отримали широке використання в легкій промисловості. Для проведення експериментальних досліджень були вибрані такі матеріали та їх марки: поліетилен (ПЕ), марка: 20108-075 та поліпропілен (ПП), марка: 1365 S. Як заготовки для поліетиленових та поліпропіленових зразків використовувалися готові поліетиленові та поліпропіленові листи товщиною 2 мм.

За допомогою спеціально виготовлених різаків на пресі ПВГ-8-0 із заготовок вирубували зразки, які мали розміри та форму згідно до вимог випробування, а саме довжину – 100 мм, ширину – 60 мм, товщину – 2 мм.

### Основна частина

Дослідження проводилися на експериментальному пристрої (рис. 1), який призначений для пластичного ослаблення структури полімерного матеріалу та часткового його руйнування. Пристрій із зубчастими валками може використовуватися для дослідження полімерних матеріалів, що використовуються в легкій промисловості, товщиною від 1 мм до 5 мм. Якщо полімерні відходи мають більшу товщину, то їх необхідно подрібнити на дробарках або дискових ріжучих ножах.

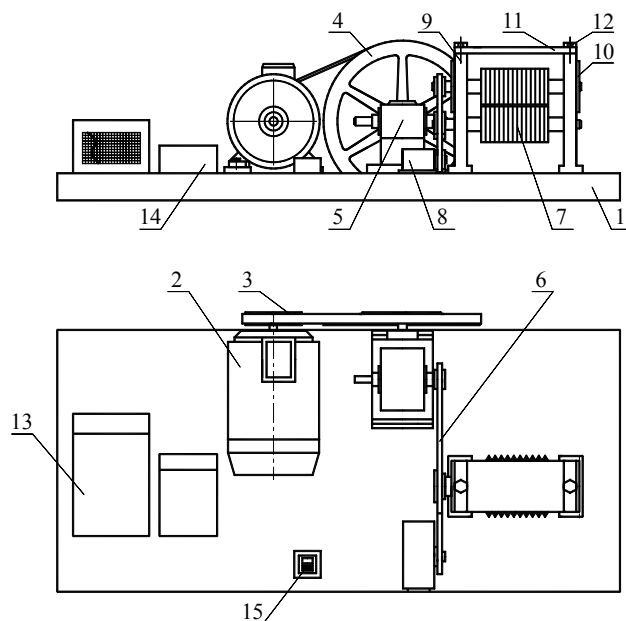


Рис.1 – Експериментальна установка із зубчастими валками:

- 1 – плита; 2 – електродвигун;
- 3 – ведучий шків; 4 – ведений шків;
- 5 – черв'ячний редуктор; 6 – ланцюгова передача;
- 7 – зубчасті валки; 8 – натяжний пристрій;
- 9 – стійки; 10 – підшипникові вузли;
- 11 – пластина; 12 – болти для регулювання міжвалкової відстані;
- 13 – пристрій для вимірювання потужності;
- 14 – трансформатор; 15 – вмикач

Експериментальний пристрій із зубчастими валками містить плиту 1, на якій розміщений електродвигун потужністю 1,5 кВт (300 об/хв), від якого передається обертання зубчастим валкам 7 через пасову передачу, ведучий шків 3 якої виконаний з можливістю зміни частоти обертання, а ведений шків 4 виконаний зі шплицями, через черв'ячний редуктор 5, ланцюгову передачу 6.

Черв'ячний редуктор 5 має передаточне відношення  $I=34$ . Ланцюгова передача 6 (ПР 12,7-1800) обходить зірочки верхнього і нижнього зубчастих валків 7 з різних боків для забезпечення протилежного обертання цих валків. Тому в конструкції експериментальної установки передбачений натяжний пристрій 8.

Зубчасті валки розташовуються між двома стійками 9, в яких розміщені підшипникові вузли 10. Необхідна жорсткість цієї конструкції забезпечується за допомогою пластини 11. За допомогою болтів для регулювання 12 можна змінювати міжвалкову відстань, тим самим забезпечуючи необхідні деформації для полімерних зразків різної товщини, не допускаючи заклинювання пристрою.

Для визначення потужності, що витрачається на переробку полімерного зразка використовується пристрій для вимірювання потужності 13, який під'єднаний через трансформатор 14 до двигуна 2.

Запуск експериментальної установки здійснюється за допомогою вимикача 15.

З метою дослідження зміни питомої енергії утворення одиниці вільної поверхні переробленого полімерного матеріалу згідно до розробленої в розділі 4 методики проектування обладнання для переробки полімерних відходів, були вибрані такі фактори:

- частота обертання зубчастих валків, яка варіювалась шляхом зміни діаметру ведучого шківів та зірочок;

- крок зубців, для зміни якого були виготовлені додаткові зубчасті валки.

Діапазон варіювання цих факторів вибирався на основі даних, отриманих з попередніх експериментальних вимірювань. Полімерні матеріали, з яких виготовлені зразки для випробування, та характеристика їх властивостей наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

**Основні характеристики полімерів, з яких виготовлені зразки [5]**

Властивість	Полімер	ПЕВП, 20108-075	ПП, 1365 S
1. Коефіцієнт температурного розширення, /К		$13 \cdot 10^{-5}$	$10 \cdot 10^{-5}$
2. Щільність, г/см <sup>3</sup>		0,95	0,90
3. Відносне подовження при розриві, %		500	400
4. Температура скловання, °С		-60	-8
5. Температура плавлення, °С		138	160
6. Границя міцності при розтягу, МПа		25	35
7. Модуль пружності при розтягу, МПа		720	1050

Отже, частоту обертання зубчастих валків будемо варіювати в межах від 30 об/хв до 170 об/хв, а крок зубців – від 4,5 мм до 13,5 мм.

Експериментальні дослідження зміни питомої енергії на утворення одиниці вільної поверхні від конструкційних та технологічних параметрів валкового пристрою передбачають отримання залежності випадкової величини, якою є питома енергія, від невідповідних змінних – частоти обертання зубчастих валків і кроку нарізки зубців.

Результатом експериментальних досліджень має бути отримання рівняння регресії математичного очікування випадкової величини (питомої енергії на утворення одиниці вільної поверхні) за невідповідними величинами (частоти обертання зубчастих валків і кроку нарізки зубців), яке може бути лінійним або криволінійним.

В основі регресійного аналізу лежать такі припущення [6]: при кожному поєднанні значень невідповідних змінних випадкова величина має нормальний розподіл; дисперсія теоретичного розподілу випадкової величини постійна; тип функції рівняння регресії відомий; незалежні змінні вимірюються з малою помилкою в порівнянні з помилкою при визначенні залежної змінної, тому нею можна нехтувати; незалежні змінні є лінійно незалежними.

Якщо проводити багаторазові повторні спостереження над залежною величиною при прийнятному наборі значень незалежних змінних, то згідно з другим припущенням отримуємо дисперсію випадкової величини, яка не буде залежати від значень незалежних змінних. Практично це означає, що при багаторазових повторних спостереженнях над залежною величиною при першому, другому, третьому і т.д. наборах незалежних значень отримані вибіркові дисперсії, що є оцінками дисперсії теоретичного розподілу, повинні бути однорідні. Однорідність оцінок дисперсії не завжди виконується в умовах реального експерименту. Якщо в цьому випадку вдається знайти функціональну залежність, то можна за-

пропонувати таке перетворення випадкової величини, яке дозволить отримати однорідні оцінки дисперсії.

При обробці результатів багатofакторного експерименту функцію будемо використовувати поліномом другого порядку:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2, \quad (3)$$

де  $b_0, b_1, b_2, b_{12}, b_{11}, b_{22}$  – коефіцієнти рівняння регресії.

Після проведення експериментальних досліджень необхідно зробити регресійний аналіз, завдання якого пролягав в наступному: перевірка гіпотези однорідності дисперсії; знаходження оцінок коефіцієнтів регресії; визначення довірчих інтервалів для істинних значень; перевірка гіпотези адекватності.

Для запису умов експерименту і обробки експериментальних даних рівні факторів кодувались. Перший фактор, тобто частота обертання зубчастих валків, кодувався  $X_1$ , другий фактор, крок зубців, –  $X_2$ .

При кодуванні значень факторів, вплив яких досліджувався, верхній рівень позначали  $+1$ , нижній  $-1$ , а нульовий  $0$ . Кодування факторів  $x_i$  визначалося таким виразом [6]:

$$x_i = \frac{X_i - X_{0i}}{\varepsilon_i}, \quad (4)$$

де  $i$  – номер фактору;

$X_i$  – натуральне значення  $i$ -го фактору;

$X_{0i}$  – натуральне значення нульового рівня  $i$ -го фактору;  $\varepsilon_i$  – інтервал зміни  $i$ -го фактору.

Експериментальні дослідження питомої енергії утворення одиниці вільної поверхні перероблених поліетиленової та поліпропіленової плівок при різних значеннях конструкційних та технологічних параметрів зубчастого пристрою проводились на рівнях варіювання та з інтервалами, які наведені в табл. 2.

Таблиця 2

### Рівні та інтервали зміни факторів

Позн.	Фактори	Рівні варіювання					Інтервал варіювання
		- 1,414	- 1	0	+ 1	+ 1,414	
Для зразків з поліпропілену та поліетилену							
X1	Частота обертання, об/хв	30	50	100	150	170	50
X2	Крок зубців, мм	4,5	6	9,0	12	13,5	3

Визначення необхідного числа вимірів, що нейтралізує можливі випадкові помилки при відомій надійній ймовірності, здійснювалося відповідно до [6]. Причому загальна величина помилки вимірів не повинна перевищувати 5 %. У результаті було встановлено, що в кожному досліді необхідно проводити чотири паралельних виміри.

Після реалізації робочої матриці, при чотирьох паралельних дослідях, отримали значення питомої енергії утворення одиниці вільної поверхні для зразків, виготовлених з поліпропілену та поліетилену.

Для аналізу результатів досліджень визначалась дисперсія помилки кожного досліду [6]:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n_n - 1}, \quad (5)$$

де  $n_n$  – кількість спостережень (кількість повторень досліду);

$y_i$  – значення параметра оптимізації для окремого спостереження;

$\bar{y}$  – середнє значення параметра.

Аналіз результатів дослідів показав, що при переробці поліпропіленових зразків в пристрої із зубчастими валками в четвертому досліді дисперсія вимірювань помітно вища, ніж в інших дослідях

( $s^2 = 8,83$ ), а при переробці поліетиленових зразків занадто велика дисперсія вимірювань спостерігається в першому досліді, відповідно,  $s^2 = 39,42$ .

У зв'язку з цим виникла необхідність перевірки однорідності дисперсій. Перевірка проводилась з урахуванням критерію Кохрена:

$$G_{расч} = \frac{s_{\max}^2}{\sum_{i=1}^N s_i^2}, \quad (6)$$

де  $N$  – число дослідів.

Підставляючи значення дисперсій у формулу (6), отримали такі результати.

При випробуванні поліпропіленових зразків:

$$G_{расч} = \frac{8,83}{61,07} = 0,15.$$

При випробуванні поліетиленових зразків:

$$G_{расч} = \frac{39,42}{250,04} = 0,16.$$

Розрахункове значення критерію менше за табличне ( $0,15 < 0,32$  та  $0,16 < 0,32$ ), тому з 95%-вою надійною ймовірністю можна стверджувати, що всі дисперсії помилок однорідні [6].

Коефіцієнти рівняння регресії (3) отримали за допомогою матричного методу [6]. Розраховані значення коефіцієнтів регресії наведені у табл. 3.

Таблиця 3

### Значення коефіцієнтів рівняння регресії

Коефіцієнт \ Матеріал	Зразок з поліпропілену	Зразок з поліетилену
$b_0$	76928,0	95722,0
$b_1$	-1728,8	-1303,3
$b_2$	7826,8	9224,5
$b_{12}$	-1097,6	512,0
$b_{11}$	-88,2	-366,4
$b_{22}$	-6033,8	-8075,0

Підставляючи значення коефіцієнтів у (3), отримаємо рівняння регресії:

Для поліпропіленового зразка:

$$y_m(x_1, x_2) = 76928,0 - 1728,8 \cdot x_1 + 7826,8 \cdot x_2 - 1097,6 \cdot x_1 \cdot x_2 - 88,2 \cdot x_1^2 - 6033,8 \cdot x_2^2. \quad (7)$$

Для поліетиленового зразка:

$$y_{ne}(x_1, x_2) = 95722,0 - 1303,3 \cdot x_1 + 9224,5 \cdot x_2 + 512,0 \cdot x_1 \cdot x_2 - 366,4 \cdot x_1^2 - 8075,0 \cdot x_2^2. \quad (8)$$

Проведемо перевірку значущості коефіцієнтів рівняння регресії. Наявність інформації про значущість коефіцієнтів дозволяє спростити рівняння.

З метою оцінки значущості коефіцієнтів регресії визначались довірчі інтервали [6]:

$$\left. \begin{aligned} \Delta b_0 &= \pm 0,894 \cdot s_{\{\bar{y}\}}; \\ \Delta b_i &= \pm 0,707 \cdot s_{\{\bar{y}\}}; \\ \Delta b_{ii} &= \pm 0,759 \cdot s_{\{\bar{y}\}}; \\ \Delta b_{ij} &= \pm s_{\{\bar{y}\}}, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

де  $s_{\{\bar{y}\}}^2$  – помилка середнього значення паралельних вимірів, яка визначалась згідно до [6].

При випробуванні поліпропіленових зразків помилка середнього значення паралельних вимірів знаходилась за такою формулою:

$$s_{\{\bar{y}\}}^2 = \frac{s_{\{y\}}^2}{n_n} = \frac{\sum_{u=1}^n \sum_{i=1}^{n_n} (y_{u,i} - \bar{y}_u)^2}{\sum_{i=1}^N (n-1)} = \frac{28,9}{4} = 7,2,$$

де  $s_{\{\bar{y}\}}^2$  – дисперсія відтворення;

$y_{u,i}$  – поточне значення паралельного вимірювання на  $u$ -му рівні варіювання частоти обертання зубчастих валків та кроку зубців;

$\bar{y}_u$  – середнє значення питомої енергії утворення одиниці вільної поверхні переробленого полімерного зразка на  $u$ -му рівні варіювання;

$n_n$  – кількість паралельних вимірювань кожного дослідження;

$n$  – кількість досліджень (або кількість рівнів варіювання).

При випробуванні поліетиленових зразків помилка середнього значення паралельних вимірів знаходилась за такою формулою:

$$s_{\{\bar{y}\}}^2 = \frac{s_{\{y\}}^2}{n_n} = \frac{\sum_{u=1}^n \sum_{i=1}^{n_n} (y_{u,i} - \bar{y}_u)^2}{\sum_{i=1}^N (n-1)} = \frac{477,2}{4} = 119,3.$$

Після підстановки помилки середнього значення паралельних вимірів у рівняння (9) були отримані довірчі інтервали коефіцієнтів регресії.

Для поліпропіленових зразків довірчі інтервали коефіцієнтів регресії дорівнюють:

$$\left. \begin{aligned} \Delta b_0 &= \pm 2,41; \\ \Delta b_1 &= \Delta b_2 = \pm 1,90; \\ \Delta b_{11} &= \Delta b_{22} = \pm 2,04; \\ \Delta b_{12} &= \pm 2,69. \end{aligned} \right\}$$

Для поліетиленових зразків довірчі інтервали коефіцієнтів регресії дорівнюють:

$$\left. \begin{aligned} \Delta b_0 &= \pm 9,77; \\ \Delta b_1 &= \Delta b_2 = \pm 7,72; \\ \Delta b_{11} &= \Delta b_{22} = \pm 8,28; \\ \Delta b_{12} &= \pm 10,92. \end{aligned} \right\}$$

Порівняння абсолютної величини коефіцієнтів і відповідних довірчих інтервалів показало, що всі коефіцієнти статично значимі, і тому рівняння регресії (7) - (8) не спрощуються.

Адекватність отриманого рівняння регресії реальним процесом перевірялася за допомогою критерію Фішера:

$$\Phi = \frac{s_{ad}^2}{s_{\{y\}}^2}, \quad (10)$$

де  $s_{ad}^2$  – залишкова дисперсія (або дисперсія адекватності).

Згідно з [6], залишкова дисперсія визначається з рівняння:

$$s_{ad}^2 = \frac{\sum_{u=1}^n n \cdot (\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2}{n - k - (n_0 - 1)}, \quad (11)$$

де  $\hat{y}_u$  – розрахункове значення параметра оптимізації;

$k = 6$  – число коефіцієнтів рівняння;

$n_0 = 5$  – число повторень нульового дослідю.

Для результатів випробування поліпропіленового зразка дисперсія адекватності дорівнює:

$$s_{ad}^2 = \frac{729,58}{13 - 6 - (5 - 1)} = 243,2,$$

а розрахункове значення критерію Фішера дорівнює:

$$\Phi_{розр} = \frac{243,2}{28,9} = 8,42.$$

Для результатів випробування поліетиленового зразка дисперсія адекватності дорівнює:

$$s_{ad}^2 = \frac{11938}{13 - 6 - (5 - 1)} = 3979,3,$$

а розрахункове значення критерію Фішера дорівнює:

$$\Phi_{розр} = \frac{3979,3}{477,2} = 8,30.$$

Порівнюючи знайдений критерій Фішера з табличним ( $8,42 < 9,10$  – при випробуванні поліпропіленових зразків;  $8,30 < 9,10$  – при випробуванні поліетиленових зразків), при вибраній надійній ймовірності, можна стверджувати, що рівняння регресії (7) - (8) є адекватними з дев'яносто п'яти відсотковою надійною ймовірністю [6].

Для одержання натуральних рівнянь підставимо значення кодованого фактора  $X$ , згідно з виразом (4), у рівняння (7) - (8) і одержимо функції залежності питомої енергії утворення одиниці вільної поверхні перероблених зразків з поліпропілену та поліетилену  $W$  від частоти обертання зубчастих валків  $n$  та кроку зубців  $t$ .

Функції залежності питомої енергії утворення одиниці вільної поверхні при переробці зразків з поліпропілену:

$$w_{nn} = 76928,0 - 1728,8 \cdot \frac{n-100}{50} + 7826,8 \cdot \frac{t-9}{3} - 1097,6 \times \\ \times \frac{n-100}{50} \cdot \frac{t-9}{3} - 88,2 \cdot \left( \frac{n-100}{50} \right)^2 - 6033,8 \cdot \left( \frac{t-9}{3} \right)^2. \quad (12)$$

Функції залежності питомої енергії утворення одиниці вільної поверхні при переробці зразків з поліетилену:

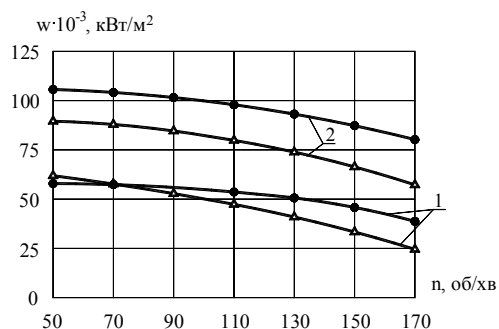
$$w_{ne} = 95722,0 - 1303,3 \cdot \frac{n-100}{50} + 9224,5 \cdot \frac{t-9}{3} + \\ + 512,0 \cdot \frac{n-100}{50} \cdot \frac{t-9}{3} - 366,4 \cdot \left( \frac{n-100}{50} \right)^2 - 8075,0 \cdot \left( \frac{t-9}{3} \right)^2. \quad (13)$$

Отримані рівняння дозволяють описати зміну питомої енергії утворення одиниці вільної поверхні при переробці поліпропіленових та поліетиленових зразків від конструктивних та технологічних параметрів пристрою із зубчастими валками, а саме від частоти обертання зубчастих валків та кроку зубців.

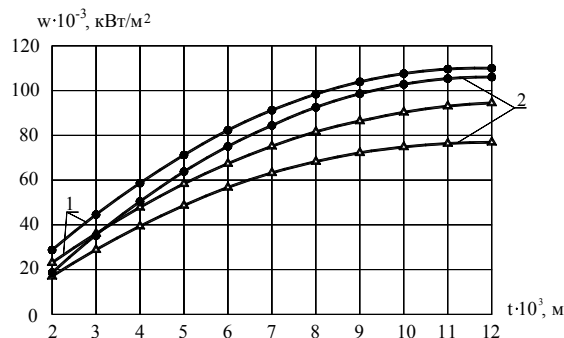
Дані залежності можуть використовуватись при розрахунках технологічних та конструкційних параметрів обладнання для переробки полімерних відходів легкої промисловості.

### Результати і висновки

На рис. 2 - 3 зображені графіки залежності питомої енергії утворення одиниці вільної поверхні від конструктивних та технологічних параметрів пристрою із зубчастими валками, в якому полімерний матеріал пластично ослабляється, тобто відбувається перетворення неорієнтованої структури в структуру орієнтованих конгломератів витягнутих сферолітів.



**Рис. 2 – Залежність питомої енергії утворення одиниці вільної поверхні полімерного зразка від частоти обертання валків:**  
 1 – крок зубців 8 мм;  
 2 – крок зубців 12 мм  
 ● – поліпропіленовий зразок;  
 ▲ – поліетиленовий зразок



**Рис. 3 – Залежність питомої енергії утворення одиниці вільної поверхні полімерного зразка від кроку зубців валка:**  
 1 – частота обертання 50 об/хв;  
 2 – частота обертання 150 об/хв  
 ● – поліпропіленовий зразок;  
 ▲ – поліетиленовий зразок

В результаті проходження поліетиленового і поліпропіленового зразків між зубчастими валками крім витягування матеріалу відбувається руйнування аморфної області полімеру вздовж напрямку його руху. Це пояснюється тим, що під час обробки полімерного матеріалу між зубчастими валками за допомогою стискаючих та розтягуючих навантажень створюється напружено-деформований стан у результаті якого структура полімерного матеріалу спочатку під впливом напружень розтягу, що виникають в результаті обертання валків та дії сил тертя між полімером і валками, витягується вздовж його подачі, а потім під впливом напружень стиску, що виникають в результаті входження валків в зачеплення, витягується в поперечному до подачі напрямку. В результаті чого напружені зв'язки між орієнтованими конгломератами витягнутих сферолітів руйнуються, що призводить до утворення тріщин в матеріалі, а отже і до збільшення площі вільної поверхні.

Як видно з рис. 2 збільшення частоти обертання зубчастих валків приводить до зменшення питомої енергії утворення одиниці вільної поверхні. Це пояснюється тим, що в результаті збільшення частоти обертання валків збільшується швидкість деформації полімерних зразків, а це приводить до виділення теплоти, в яку переходить робота, що виконується при деформації, яка не встигає розсіятися, в результаті чого збільшуються теплові флуктуації в матеріалі. Як відомо з [7] зростання температури збільшує ймовірність розриву напружених зв'язків між конгломератами витягнутих сферолітів, в результаті чого площа вільної поверхні переробленого полімеру збільшується, а отже питома енергія утворення одиниці цієї площі зменшується.

Як видно з рис. 3 зі збільшенням кроку зубців валка збільшується питома енергія утворення одиниці вільної поверхні. Це пояснюється тим, що чим більший крок зубців, тим менше деформація полімерного матеріалу поперек його подачі у міжвалковий простір, тобто менше зруйновано напружених зв'язків між орієнтованими конгломератами витягнутих сферолітів, а отже менша площа вільної поверхні переробленого зубчастими валками полімерного матеріалу.

## Література

1. Synyuk Oleh. Determination of rational structural parameters of devices for polymer recycling / Oleh Synyuk // Scientific Journal of the Ternopil National Technical University. – Ternopil, 2017. – № 1. – P. 53-60.
2. Chen Z. Micromechanics Modelling of Ductile Fracture / Z. Chen, C. Butcher. – Springer Science+Business Media Dordrecht, 2013. – 307 p.
3. Cavazos E. Fracture and Bending Mechanics / E. Cavazos, R. Khan. – Academic Studio, 2012. – 131 p.
4. Bui H.D. Fracture Mechanics / H.D. Bui. – Springer Inverse Problems and Solutions, 2006. – 375 p.
5. Мантия Ф. Ла. Вторичная переработка пластмасс / Ф. Ла Мантия; пер. с англ. под. ред. Г.Е. Зайкова. – СПб. : Профессия, 2006. – 400 с.
6. Тихомиров В. Б. Планирование и анализ эксперимента / В. Б. Тихомиров – М.: Легкая индустрия, 1974. – 263 с.
7. Тагер А. А. Физико-химия полимеров / А. А. Тагер – М. : Научный мир, 2007. – 576 с.

Поступила в редакцію 15.12.2017



**Synyuk O.M. Experimental research of destruction of polyethylene and polypropylene films.**

The dependence of the specific energy of formation of the free surface unit of recycled polyethylene and polypropylene films on various values of structural and technological parameters of a roller device was experimentally investigated. The equations obtained from the approximation of the results of the investigation can describe the change in the specific energy of the formation of a free surface unit during the recycling of polypropylene and polyethylene films from the structural and technological parameters of the device with toothed rolls, namely the frequency of rotation of the toothed rolls and the step of the teeth.

These dependencies can be used in calculations of technological and structural parameters of equipment for the recycling of polymeric waste from light industry.

**Key words:** waste, polymer, roller device, experiment, destruction, specific energy.

**References**

1. Synyuk Oleh. Determination of rational structural parameters of devices for polymer recycling / Oleh Synyuk. Scientific Journal of the Ternopil National Technical University. Ternopil, 2017. # 1. P. 53-60.
2. Chen Z. Micromechanics Modelling of Ductile Fracture. Z. Chen, C. Butcher. Springer Science+Business Media Dordrecht, 2013. 307 p.
3. Cavazos E. Fracture and Bending Mechanics. E. Cavazos, R. Khan. Academic Studio, 2012. 131 p.
4. Bui H.D. Fracture Mechanics. H.D. Bui. Springer Inverse Problems and Solutions, 2006. 375 p.
5. Mantiya, F. La. (2006). *Vtorichnaya pererabotka plastmass* [Secondary recycling of plastics]. G.E. Zaykova (Ed.). St. Petersburg : Professiya [in Russian].
6. Tikhomirov V. B. (1974). *Planirovaniye i analiz eksperimenta* [Planning and analysis of the experiment], Moscow : Legkaya industriya, 263 [in Russian].
- 7 Tager A.A. (2007). *Fiziko-khimiya polimerov* [Physicochemistry of polymers], Moscow : Nauchnyi mir, 576 [in Russian].