

УДК 678.027.3

## ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНЬ У ПРОЦЕСІ ВИРОБНИЦТВА РУКАВНОЇ ПОЛІМЕРНОЇ ПЛІВКИ

*Встановлено зв'язок між зусиллями, що розтягують плівковий рукав, і перепадом тиску в соплах, які різною мірою прогинають рукав. Розроблений алгоритм розрахунку таких розтягуючих зусиль за результатами вимірювань перепаду тисків у пневматичному вимірювальному пристрої*

*Ключові слова: полімерна плівка, пневматичний вимірювальний пристрій*

*Установлена связь между усилиями, растягивающими пленочный рукав, и перепадом давления в соплах, в различной степени прогибающих рукав. Разработан алгоритм расчета таких растягивающих усилий по результатам измерения перепада давления в пневматическом измерительном устройстве*

*Ключевые слова: полимерная пленка, пневматическое измерительное устройство*

*The connection between efforts stretching tubular sheeting and the pressure difference in the nozzles, in varying degrees of flex tube. An algorithm for calculating such tensile forces by the results of measuring the pressure difference in the pneumatic measuring device*

*Keywords: tubular film, pneumatic, measurement devise*

**В. В. Гончаренко**

Кандидат технічних наук, доцент\*

Контактний тел.: 063-343-81-22; (044) 279-84-05

E-mail: vvgonch@ukr.net

**Є. В. Кравченко\***

Контактний тел.: 097-977-75-86; 093-730-90-10

E-mail: flameous@rambler.ru

**І. О. Мікульонк**

Доктор технічних наук, професор\*

\*Кафедра хімічного, полімерного та силікатного машинобудування\*\*

Контактний тел.: 066-748-65-65; (044) 406-84-40

E-mail: i.mikulionok@kpi.ua

**Д. М. Швед**

Аспірант

Кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв\*\*

Контактний тел.: (069) 809-61-72; (044) 246-35-32

E-mail: vvgonch@ukr.net

\*\*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»  
пр. Перемоги, 37, м. Київ, 03056

### 1. Вступ

Процес формування рукавної полімерної плівки розглядався в багатьох публікаціях, наприклад [1, 2], в яких наведено великий список використаної літератури.

Серед багатьох літературних посилань немає жодної згадки про те, що в процесі виготовлення полімерних рукавних плівок проводилося експериментальне визначення розтягуючих зусиль (напружень), що діють у плівковому рукаві в процесі його формування.

У той же час знання величини таких зусиль (напружень) відкриває широкі можливості для більш глибокого розуміння процесів накопичення пружних (а точніше, високоеластичних) деформацій у рукавній плівці, що отримується, оскільки саме величина таких деформацій є ключовим параметром, який визначає ступінь термічної усадки полімерних плівок.

Авторами було розроблено пневматичний пристрій ПБПВН для вимірювання поздовжніх зусиль, що виникають у плівковому рукаві в процесі його формування [3].

Принцип дії даного пристрою полягає в тому, що полімерна рукавна плівка, яка перебуває в процесі виробництва у напруженому стані, грає роль заслінки, що з різною інтенсивністю на різних ділянках зони прогину перекриває вихід стисненого повітря із двох однакових сопел. Перепад тисків у цих соплах, що виникає при цьому і вимірюється за допомогою диференціального манометра, залежить від інтенсивності діючих у полімерній плівці напружень. До останнього часу така система вимірювання напружень у плівковому рукаві не була апробована на практиці.

Тому метою цієї роботи є експериментальне дослідження залежностей між параметрами, які визначають інтенсивність напружень у плівковому рукаві, і перепадом тиску, що визначається за допомогою пневматичного пристрою ПБПВН.

### 2. Методика проведення вимірювань

Три сопла діаметром 2,5 мм розташовані в одній площині. Відстань між соплами 64 мм. Середнє сопло відносно крайніх двох розміщене нижче на

2,4 мм. У дві камери, із яких виходять два сусідніх сопла, надходить одна і та сама кількість повітря. Отже, перепад тиску в цих камерах при повністю відкритих соплах дорівнює нулю. Якщо даний вимірювальний пристрій притиснутий до плівкового рукава, то плівка, яка грає роль заслінки, буде перекривати центральне сопло меншою мірою. При цьому виникає перепад тиску  $\Delta p$  (Па), який вимірюється диференціальним манометром.

Чим більший натяг плівкового рукава, і чим товстіша плівка, тим більша різниця в притисненні до сопла плівки, яка виконує роль заслінки, тим вищий перепад тиску  $\Delta p$  (Па).

### 3. Розрахунки параметрів плівкового рукава

Площа поперечного перерізу роздутого  $i$ -го рукава  $S_{pi}$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ),  $m^2$

$$S_{pi} = \frac{A_i^2}{\pi}, \quad (1)$$

де  $A_i$  – ширина рукава у складеному вигляді, м.

Розтягуюче зусилля на одиницю ширини рукава (по периметру)  $\Delta F_{ijk}$  (Н/м) розраховується як

$$\Delta F_{ijk} = \frac{F_{ij} + F_{i(p_k)}}{2A_i}, \quad (2)$$

де  $F_{ij}$  –  $j$ -те зовнішнє навантаження на  $i$ -й рукав, Н;  $p_k$  – тиск усередині плівкового рукава, Па;  $i$  – порядковий номер рукава ( $i=1, 2, 3, 4$ );  $j$  – порядковий номер зовнішнього розтягуючого навантаження ( $j=1, 2, 3, 4$ , при цьому індекс 1 відповідає відсутності навантаження, 2 – навантаженню 20Н, 3 – 40Н, 4 – 60Н);  $k$  – порядковий номер тиску усередині  $i$ -го рукава;  $F_{i(p_k)}$  – розтягуюче зусилля, спричинене наявністю тиску усередині плівкового рукава з площею поперечного перерізу  $S_{pi}$ , яке розраховується за формулою

$$F_{i(p_k)} = \pi^{-1} A_i^2 p_k. \quad (3)$$

Відношення  $\zeta_{ijk}$  (м) розраховується як

$$\zeta_{ijk} = \frac{\Delta F_{ijk}}{\Delta p_{ijk}}, \quad (4)$$

де  $\Delta p_{ijk}$  – перепад тиску на приладі, Па.

Зразок розрахунку зусилля  $\Delta F_{442}$  та відношення  $\zeta_{442}$ :

$$\Delta F_{442} = \frac{60 + 3,14^{-1} \cdot 0,416^2 \cdot 1155}{2 \cdot 0,416} = 1,4862 \cdot 10^2 \frac{H}{m},$$

$$\zeta_{442} = \frac{0,148 \cdot 10^3}{4,2 \cdot 10^3} = 3,54 \cdot 10^{-2} m.$$

### 4. Алгоритм розрахунку параметрів математичної моделі

1. Для кожної  $i$ -ї плівки розрахувати математичне очікування  $E_i(\zeta_{ijk})$

$$E_i(\zeta_{ijk}) = \frac{1}{n} \sum_1^n \zeta_{ijk}, \quad (5)$$

де  $n=9$  – кількість вимірювань при навантаженні.

2. Отримані чотири точки  $E_i(\zeta_{ijk})$  нанести на графік (рис. 1) і апроксимувати їх прямою  $\zeta = f(\delta)$ , рівняння якої має вигляд

$$\zeta_i = a_i + b\delta_i. \quad (6)$$

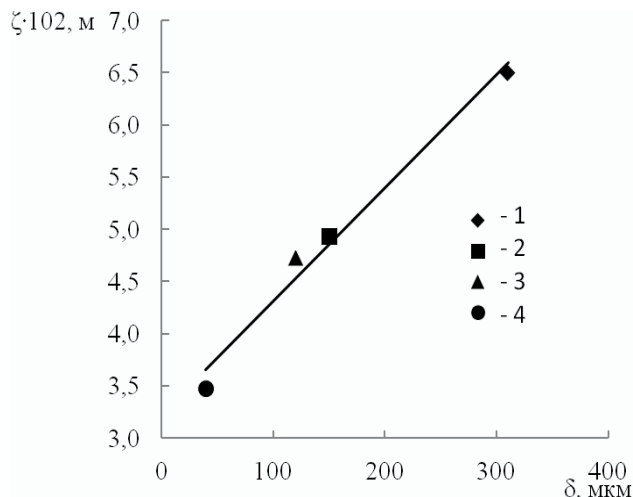


Рис. 1. Залежність математичного очікування константи  $\zeta_i$  від товщини плівки  $\delta_i$ : 1, 2, 3, 4 – номери плівок в табл. 1.

Параметр  $b$  розраховується за формулою

$$b = \frac{\zeta_2 - \zeta_1}{\delta_2 - \delta_1}, \quad (7)$$

де 1, 2 – точки на апроксимуючій прямій (початкова і кінцева).

3. Для кожної експериментальної точки з індексом ( $ijk$ ) знайти значення константи  $a_{ijk}$

$$a_{ijk} = \zeta_{ijk} - b\delta_i. \quad (8)$$

4. Знайти математичне очікування для константи  $a_{ijk}$

$$E(a_{ijk}) = \frac{1}{n} \sum_1^n a_{ijk}, \quad (9)$$

де  $n$  – кількість всіх точок.

Рівняння апроксимуючої прямої (4) для плівок з поліетилену 15803-20 має вигляд

$$\zeta_{ijk} = 3,22 \cdot 10^{-2} + 108,65\delta. \quad (10)$$

5. Результати експериментальних досліджень  
Результати вимірювань і розрахунків занесені до табл. 1.

Таблиця 1

Експериментальні результати дослідження перепаду тиску на рукавних плівках, виготовлених з поліетилену низької густини 15803-020

Номер плівки	1			2			3			4			
Ширина складеного рукава, $A_1$ , м	0,383			0,414			0,429			0,416			
Товщина плівки, $\delta_1$ , мкм	310			150			120			40			
Тиск усередині рукава, $p_k$ , кПа	0,93	1,28	1,64	0,85	1,19	1,55	0,90	1,26	1,61	0,80	1,16	1,51	
Зовнішнє розтягуючі зусилля на рукаві, $F_{ij}$ , Н	Перепад тиску на приладі, $\Delta p_k \cdot 10^{-3}$ , Па												
	0	1,40	1,40	1,40	1,92	1,92	1,92	2,10	2,10	2,10	2,36	2,36	2,36
	20	1,52	1,66	1,78	2,02	2,32	2,64	2,24	2,42	2,68	2,64	3,16	3,46
	40	1,74	2,04	2,20	2,30	2,48	2,90	2,54	2,80	2,86	2,88	3,48	4,42
	60	1,88	2,44	2,70	2,46	2,54	3,32	2,80	3,10	3,50	3,08	4,20	4,96
	Розтягуюче зусилля на одиницю ширини рукава, $\Delta F_{ijk} \cdot 10^{-2}$ , Н/м												
	0	0,56	0,78	1,00	0,56	0,78	1,02	0,62	0,86	1,10	0,53	0,77	1,00
	20	0,83	1,04	1,26	0,80	1,02	1,26	0,85	1,09	1,33	0,77	1,01	1,24
	40	1,09	1,30	1,52	1,04	1,26	1,50	1,08	1,32	1,57	1,01	1,25	1,48
	60	1,65	1,56	1,78	1,29	1,51	1,74	1,31	1,56	1,80	1,25	1,49	1,72
	Відношення, $\zeta_{ijk} \cdot 10^2$ , м												
	0	4,03	5,58	7,12	2,92	4,07	5,31	2,93	4,08	5,24	2,25	3,24	4,24
	20	5,43	6,28	7,07	3,97	4,41	4,77	3,79	4,51	4,97	2,92	3,18	3,59
	40	6,24	6,39	6,91	4,54	5,10	5,18	4,26	4,73	5,48	3,51	3,58	3,35
	60	7,17	6,41	6,59	5,22	5,93	5,25	4,63	5,02	5,14	4,06	3,54	3,47
	Математичне очікування, $E_i(\zeta_{ijk}) \cdot 10^2$												
6,4978			4,9296			4,7309			3,4663				
Константа $a_{ijk} \cdot 10^2$ при $b = 108,65$													
20	2,06	2,91	3,70	2,34	2,78	3,14	2,48	3,20	3,67	2,48	2,75	3,15	
40	2,88	3,02	3,54	3,91	3,47	3,55	2,95	3,42	4,17	3,08	3,15	2,92	
60	3,80	3,04	3,23	3,59	4,30	3,62	3,39	3,72	3,84	3,63	3,10	3,04	
Математичне очікування $E(a_{ijk}) = 3,2221 \cdot 10^{-2}$													

**6. Алгоритм розрахунку зовнішнього навантаження на рукав**

При параметрах плівкового рукава  $A_1 = 0,383$  м,  $\delta_1 = 0,31 \cdot 10^{-3}$  м,  $p_2 = 1,28$  кПа вимірвальний прилад дає значення  $\Delta p_{132} = 2,04$  кПа.

Відношення  $\zeta_{132}$ , розраховане за допомогою рівняння апроксимуючої прямої (10), дорівнює

$$\zeta_{132} = 108,65 \cdot 0,31 \cdot 10^{-3} + 3,22 \cdot 10^{-2} = 6,5882 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

Параметр  $\Delta F_{132}$  розраховуємо за формулою

$$\Delta F_{132} = \zeta_{132} \Delta p_{132}, \tag{11}$$

наприклад:

$$\Delta F_{132} = 6,5882 \cdot 10^{-2} \cdot 1,04 \cdot 10^3 = 134,4 \frac{\text{Н}}{\text{м}}.$$

Зусилля, яке розтягує плівковий рукав, розраховується як  $\Delta F_{132} 2A_1$  (2), наприклад

$$\Delta F_{132} 2A_1 = 134,4 \cdot 2 \cdot 0,383 = 102,95 \text{ Н.}$$

Розтягуючі зусилля  $F_{i(p_k)}$ , спричинене тиском всередині рукава, розраховується за формулою (3), наприклад

$$F_{i(p_2)} = 1280 \cdot \frac{0,383^2}{3,14} = 59,8 \text{ Н.}$$

В такому разі зовнішнє зусилля  $F_{ij}$  розраховується за формулою

$$F_{ij} = 2A_i \Delta F_{ijk} - F_{i(p_2)}, \quad (12)$$

наприклад:

$$F_{13} = 102,95 - 59,8 = 43,15 \text{ Н.}$$

У дійсності  $F_{13} = 40 \text{ Н}$ . Похибка складає 7,9% і є допустимою.

Таким чином, одержано підтвердження того, що формула (10) виражає всі результати експериментальних досліджень при різному тиску всередині плівкового рукава ( $p_k$ ), різній ширині рукава ( $A_i$ ), товщині рукава ( $\delta_i$ ), зовнішніх розтягуючи зусиллях ( $F_{ij}$ ).

### 7. Висновки

1. З'являється можливість розрахунку зовнішнього розтягуючого зусилля на рукаві, якщо на працюючому плівковому агрегаті за допомогою приладу виміряти перепад тиску  $\Delta p_{ijk}$  при відомих параметрах  $A_i$ ,  $\delta_i$ ,  $p_k$  в даному процесі.

2. Як видно з рис. 1, збільшення товщини плівки  $\delta_i$  призводить до підвищення перепаду тиску у вимі-

рювальному пристрої. Залежність  $\zeta(\delta)$ , що визначає інтенсивність такого підвищення, з невеликими похибками може бути прийнята лінійною.

### 8. Номенклатура

$A_i$  – ширина рукава у складеному вигляді, м;  
 $\zeta_{ijk}$  – математичне очікування параметра  $\zeta_{ijk}$ ;  $F_{ij}$  – j-те зовнішнє навантаження на i-й рукав, Н;  $n$  – кількість вимірювань на i-му рукаві, що має зовнішнє j-те навантаження  $F_{ij} > 0$ ;  $p_k$  – тиск усередині плівкового рукава, Па;  $\Delta F_{ijk}$  – j-те розтягуючи зусилля, що діє на i-й плівковий рукав при k-му тиску всередині рукава і приходить на 1м ширині рукава, Н/м;  $\Delta p_{ijk}$  – перепад тиску на вимірювальному приладі на i-му рукаві, розтягнутому j-м зусиллям і роздутому k-м тиском, м;  $\delta_i$  – товщина i-го плівкового рукава, м;  $\zeta_{ijk}$  – відношення  $\Delta F_{ijk}$  до  $\Delta p_{ijk}$ ; індекси: i – порядковий номер рукава (i=1, 2, 3, 4); j – порядковий номер зовнішнього розтягуючого навантаження (j=1, 2, 3, 4, при чому 1 відповідає відсутності навантаження, 2 – навантаженню 20Н, 3 – 40Н, 4 – 60Н); k – порядковий номер тиску усередині i-го рукава (k =1, 2, 3, 4).

### Література

1. Kanai, T. Kinematics, Dynamics and Stability of the Tubular Film Extrusion of Various Polyethylenes / Kanai, T., White, J. // Polymer Engineering and Science. – 1984. – Vol. 24, No. 15. – Pp. 1185-1201.
2. Khonakdar, H.A. Mathematical and Computational Modeling of Film Blowing Process / Khonakdar, H.A., Morshedean, J., Nodehi, A.O. // Journal of Applied Polymer Science. – 2002. – Vol. 86. – Pp. 2115-2123.
3. Устройство для бесконтактного пневматического измерения напряжений в процессе производства рукавной полимерной пленки (УБПИН) : Материалы 27-й международной конференции «Композиционные материалы в промышленности», 2007. г. Ялта, Украина. / Гончаренко В.В., Швед Н.П., Миклуленок И.О., Лелека О.М. – С. 143-144.