

## РОЗДІЛ I. МЕХАНІКА

УДК 678.057.5

*Валерій Бакалов, Софія Скрипник, Петро Чередніченко, Олександр Ігнатенков*

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРИЙМАЛЬНО-ОХОЛОДЖУЮЧОГО ОБЛАДНАННЯ НА ШИРИНУ ФОРМОВАНОЇ ПОЛІМЕРНОЇ ПЛІВКИ

*Валерий Бакалов, София Скрипник, Петр Чередниченко, Александр Игнатенков*

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИЕМНО-ОХЛАЖДАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ШИРИНУ ФОРМУЕМОЙ ПОЛИМЕРНОЙ ПЛЕНКИ

*Valery Bakalov, Sofia Skrypnyk, Petr Cherednichenko, Alexander Ihnatenkov*

### STUDY OF GEOMETRIC PARAMETERS OF FOSTER-COOLING EQUIPMENT ON THE WIDTH OF THE FORMABILITY OF THE POLYMER FILM

Полімерні плівки знаходять все більше застосування як пакувальні матеріали у різних галузях промисловості. Існуючі методи розрахунку не дозволяють визначити ширину формованої полімерної плівки залежно від геометричних параметрів приймально-охолоджуючого обладнання. Це стримує впровадження такого обладнання у промисловість.

Робота присвячена розробленню математичної моделі процесу витягування плоскої полімерної плівки між плоскощільною головкою і приймально-охолоджуючим валком, а також процесу витягування і звуження ширини плівки на охолоджувальному валку.

Математична модель дозволяє визначити вплив: геометричних розмірів установки (діаметра приймально-охолоджуючого валка, відстані від нього до плоскощільної головки) і коефіцієнта тертя полімерної плівки про приймально-охолоджуваний валок на ширину і товщину полімерної плівки, що виробляється.

**Ключові слова:** моделювання, полімерна плівка, формування, витягування, ширина плівки, коефіцієнт тертя, приймально-охолоджуючий валок.

*Рис.: 6. Бібл.: 4.*

Полимерные пленки находят все большее применение в качестве упаковочных материалов в различных отраслях промышленности. Существующие методы расчета не позволяют определить ширину формируемой полимерной пленки в зависимости от геометрических параметров приемно-охлаждающего оборудования. Это сдерживает внедрение такого оборудования в промышленность.

Работа посвящена разработке математической модели процесса вытягивания плоской полимерной пленки между плоскощелевой головкой и приемно-охлаждающим валиком, а также процесса вытягивания и сужения ширины пленки на охлаждающем валике.

Математическая модель позволяет определить влияние: геометрических размеров установки (диаметра приемно-охлаждающего валика, расстояния от него до плоскощелевой головки) и коэффициента трения полимерной пленки о приемно-охлаждаемый валик на ширину и толщину полимерной изготавливаемой пленки.

**Ключевые слова:** моделирование, полимерная пленка, формование, вытягивание, ширина пленки, коэффициент трения, приемно-охлаждающий валик.

*Рис.: 6. Библ.: 4.*

Polymer films are increasingly used as packaging materials in various industries. There is not possible to determine the width of the formed polymer film, depending on the geometrical parameters of two-way cooling equipment with existing methods of calculation. It is hamper the introduction of such equipment in the industry.

The article is dedicated to the development of a mathematical model of process of stretching a flat polymer film between the flat die and the cooling roller and process of stretching and narrowing the width of the film on the cooling roll.

The proposed mathematical model is allow to determine the effect of: geometrical dimensions of equipment (the diameter of cooling roll, the distance from it to a flat die) and the friction coefficient of a polymer film on the cooling roll by the width and thickness of the polymer film products.

**Key words:** modeling, polymer film, molding, extrusion, film width, coefficient of friction, receiving and cooling roll.

*Fig.: 6. Bibl.: 4.*

**Постановка проблеми.** Полімерні плівки знаходять все більше застосування як пакувальні матеріали в різних галузях промисловості. Існуючі методи розрахунку не дозволяють визначити ширину формованої полімерної плівки залежно від геометричних параметрів приймально-охолоджуючого обладнання. Це стримує впровадження такого обладнання у промисловість.

У процесі виробництва плівки методом плоскощільної екструзії, найбільший вплив на якість виробленої плівки справляють два вузли – екструзійна головка, яка формує по-

лімерну плівку з розплаву і приймально-охолоджуючий валок, який витягує й охолоджує плівку [1; 2]. Приймально-охолоджуючий валок встановлюється за екструзійною головкою і забезпечує витягуванням необхідну товщину, ширину плівки й охолоджує її до необхідної температури.

У зв'язку з цим на якість полімерної плівки впливають такі чинники:

- реологічні процеси, які проходять в екструзійній голівці;
- процес витягування полімерної плівки, який має місце на ділянці між екструзійною головкою та охолоджуючим валком;
- процес витягування полімерної плівки на охолоджуючому валку, який супроводжується зміною ширини плівки.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботах [1; 2] представлена розрахункова схема для визначення ширини і товщини полімерної плівки при її витягуванні між плоскощільною головкою і приймально-охолоджуючим валком. Представлена розрахункова схема базується на тому, що:

- сила тертя між полімерною плівкою і валком прикладена в одній точці;
- сила, яка витягує полімерну плівку, також додана в одній точці і спрямована перпендикулярно осі валка.

Такі припущення не зовсім точно описують процес витягування полімерної плівки між плоскощільною головкою і охолоджуючим валком [1; 2].

**Невирішені питання витягування плівки.** Відомо [1–3], що витягувальна сила зменшується від максимального значення в точці дотику полімерної плівки приймально-охолоджуючого валка до мінімального значення, яке існує у плівці після проходження нею приймально-охолоджуючого валка.

У зв'язку з цим ширина і товщина полімерної плівки, мають бути іншими в порівнянні зі значеннями, розрахованими за формулами робіт [1; 2].

**Мета роботи.** Робота присвячена розробленню математичної моделі процесу витягування плоскою полімерної плівки між плоскощільною головкою і приймально-охолоджуючим валком, а також процесу витягування і звуження ширини плівки на охолоджувальному валку.

**Викладення основного матеріалу.** На рис. 1 показана схема дії сил на полімерну плівку при взаємодії її з охолоджуючим валком. Зі схеми видно, що перед валком сила натягу полімерної плівки дорівнює  $T_0$ , а після валка мінімальна  $T_1$ .

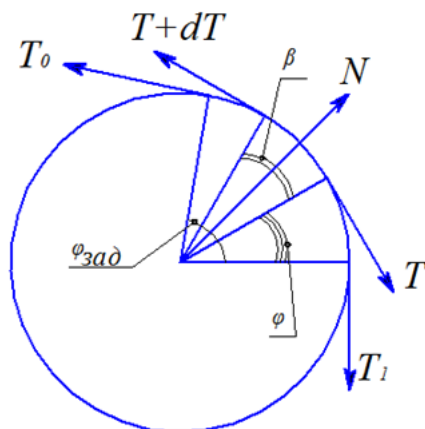


Рис. 1. Схема дії сил на полімерну плівку на приймально-охолоджуючому валку

Поточна сила натягу полімерної плівки на валку  $T$  розраховується за формулою Ейлера [2]:

$$T = T_1 e^{f\varphi}, \quad (1)$$

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

де  $T_l$  – сила натягу полімерної плівки після приймально-охолоджуючого валка, яка не може бути більше напруги пружності відповідно до закону Гука ( $T_l \leq T_{Гука}$ );  $f$  – коефіцієнт тертя полімерної плівки о приймально-охолоджуючий валок;  $\varphi$  – поточний кут обхвату плівкою приймально-охолоджуючого валка;  $\varphi_{зад}$  – заданий кут обхвату приймально-охолоджуючого валка полімерною плівкою.

Сила тертя полімерної плівки о приймально-охолоджуючий валок буде визначатися за формулою:

$$F_{mp} = N \cdot f, \tag{2}$$

де  $N$  – нормальна складова дії сил натягу полімерної плівки.

У свою чергу, нормальна складова розраховується за формулою (рис. 1):

$$N = (T + dT) \cdot \sin \frac{\beta}{2} + T \cdot \sin \frac{\beta}{2} = \sin \frac{\beta}{2} \cdot (2T + dT), \tag{3}$$

де  $\beta$  – поточний кут обхвату полімерною плівкою приймально-охолоджуючого валка.

Підставляючи формулу (3) в (2), отримуємо:

$$F_{mp} = f \cdot \sin \frac{\beta}{2} \cdot (2T + dT). \tag{4}$$

Згідно з (4) епюра розподілу сил тертя полімерної плівки на валку матиме такий вигляд (рис. 2).

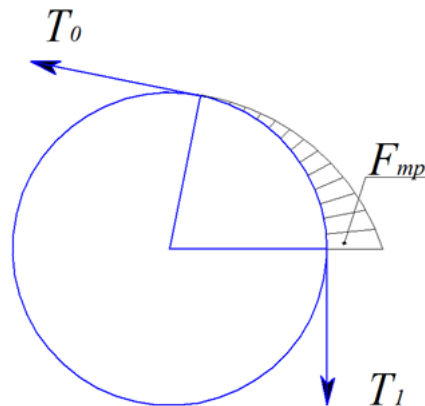


Рис. 2. Епюра розподілу сил тертя полімерної плівки на приймально-охолоджуючому валку

Підставляючи формулу (1) в (4) і нехтуючи малою величиною  $dT$ , отримаємо узагальнену формулу для визначення сили тертя полімерної плівки о приймально-охолоджуючий валок:

$$F_{mp} = f \cdot \sin \frac{\varphi_{зад} - \varphi}{2} \cdot (T_1 \cdot e^{f \cdot \varphi_{зад}} + T_1 \cdot e^{f \cdot \varphi}). \tag{5}$$

Оскільки поперечна сила, яка стягує полімерну плівку, у два рази менше, ніж сила розтягування плівки [1–3], маємо:

$$F_{cm} = \frac{T - T_{Гука}}{2} \cdot \frac{b}{b_0}, \tag{6}$$

де  $b_0, b$  – початкова і поточна ширина полімерної плівки відповідно.

Підставляючи формулу (1) у формулу (6), отримаємо:

$$F_{cm} = \frac{T_1 \cdot e^{f \cdot \varphi} - T_{Гука}}{2} \cdot \frac{b}{b_0}. \tag{7}$$

У точці, де поточне значення натягу полімерної плівки  $T < T_{Гука}$ , поперечна стягуюча сила буде  $F_{cm} = 0$ .

На рис. 3 показана схема дії сил у довільній точці на краю полімерної плівки, яка розташована на приймально-охолоджуючому валку.

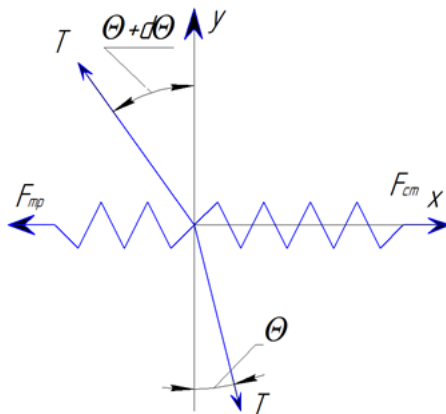


Рис. 3. Схема дії сил в довільній точці на краю плівки, яка розташована на приймально-охолоджуючому валку

Проекція всіх сил на вісь  $OX$  буде дорівнювати  $\Sigma F_x = 0$ . Тоді отримаємо:

$$F_{cm} + T \cdot \sin \theta = F_{mp} + T \cdot \sin(\theta + d\theta), \quad (8)$$

де  $\theta$  – кут дії сили, що розтягує;  $\theta + d\theta$  – кут дії сили, що розтягує в напрямку плоскощільної головки.

З рівняння (8) знаходимо додатковий кут:

$$d\theta = \arcsin \frac{F_{cm} + T \cdot \sin \theta - F_{mp}}{T} - \theta. \quad (9)$$

Підставляючи формули (5) і (6) у формулу (9), отримаємо диференціальне рівняння першого порядку:

$$d\theta = \arcsin \frac{\frac{T_1 \cdot e^{f \cdot \varphi} - T_{Гука}}{2} \cdot \frac{b}{b_0} + T_1 \cdot e^{f \cdot \varphi} \cdot \sin \theta - f \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \cdot (T_1 \cdot e^{f \cdot \varphi_{зад}} + T_1 \cdot e^{f \cdot \varphi})}{T_1 \cdot e^{f \cdot \varphi}} - \theta, \quad (10)$$

де  $\varphi_{зад}$  – заданий кут охоплення полімерною плівкою приймально-охолоджуючого валка;  $\varphi$  – поточний кут у радіанах;  $\theta$  – кут нахилу краю полімерної плівки.

З огляду на те, що у формулу (10) входить поточний кут, визначимо його з початкових умов. Відомо, що при  $F_{mp} > F_{cm}$  кут нахилу краю полімерної плівки дорівнює нулю  $\theta = 0$ .

Тоді розрахунок починаємо з точки  $A$  (рис. 4), в якій полімерна плівка виходить з приймально-охолоджуючого валка. Слід зазначити, що в точці  $A$  невідома кінцева ширина полімерної плівки  $b$ .

Тому кінцеву ширину плівки  $b$  будемо шукати з точністю менше 1 мм методом дихотомії [4], ставлячи собі максимальну і мінімальну ширину полімерної плівки після приймально-охолоджуючого валка. Ширина полімерної плівки повинна бути такою, щоб плівка, яка виходить з точки  $B$  під розрахованим початковим кутом  $\theta_{нач}$ , потрапила в кінець плоскощільної головки, у точку  $C$  (ширина плівки на виході з плоскощільної головки  $b_0$ ). Цей метод в обчислювальній математиці називають методом «стрілянини» [4].

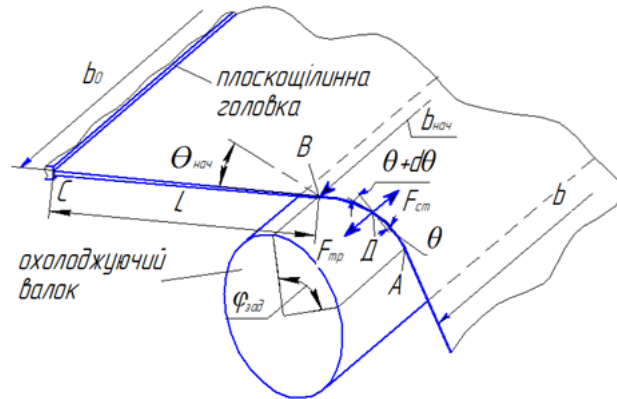


Рис. 4. Схема витягування полімерної плівки між плоскощілинною головкою і приймально-охолоджуючим валком

Вихідна ширина полімерної плівки розраховується за формулою:

$$b_0 = b_{нач} + 2 \cdot L \cdot \operatorname{tg} \theta_{нач}, \tag{11}$$

де  $b_{нач}$  – початкова ширина полімерної плівки при її торканні охолоджуючого валка;  $\theta_{нач}$  – кут, який створює край полімерної плівки при торканні охолоджуючого валка в напрямку плоскощілинної головки.

Для знаходження кінцевої ширини полімерної плівки за рівняннями (10), (11) була розроблена блок-схема і програма, яка дозволяє розраховувати ширину полімерної плівки уздовж осі її витягування.

На підставі результатів, розрахованих за програмою, побудована залежність кінцевої ширини полімерної плівки на приймально-охолоджуючому валку залежно від відстані до плоскощілинної головки (рис. 5). З рис. 5 видно, що на ділянці між плоскощілинною головкою і приймально-охолоджуючим валком ширина полімерної плівки лінійно зменшується, а на валку ширина плівки зменшується по експоненті.

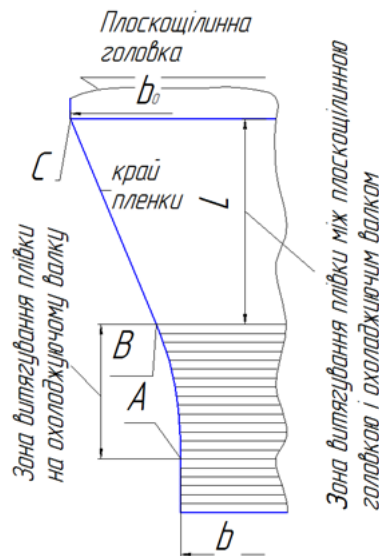


Рис. 5. Зміна розрахункової ширини полімерної плівки вздовж вісі витягування

Розрахунки показали, що ширина плівки значно залежить від коефіцієнта її тертя о приймально-охолоджуючий валок. Із рис. 6 видно, що ширина полімерної плівки лінійно зменшується зі збільшенням коефіцієнта її тертя о приймально-охолоджуючий валок і зростанням його діаметра.

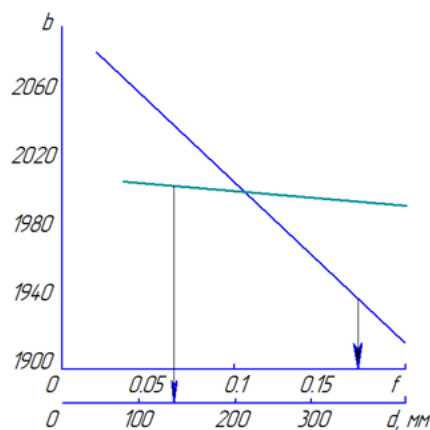


Рис. 6. Графік залежності ширини полімерної плівки від коефіцієнта її тертя ( $f$ ) і діаметра охолоджуючого валка ( $d$ )

**Висновки і пропозиції.** Таким чином, запропонована математична модель може бути використана для визначення ширини полімерної плівки виробленої плоскощілинним методом залежно від геометричних параметрів установки (відстані  $L$  від головки до приймально-охолоджуючого валка і його діаметра  $d$ ).

#### Список використаних джерел

1. *Чердніченко П. І.* Моделивання процесу руху полімеру у плоскощілинній головці / П. І. Чердніченко, В. Г. Бакалов, О. В. Бакалов // Математичні машини і системи. – 2009. – № 1. – С. 150–158.
2. *Чердніченко П. І.* Плоскощілинні головки для ламінування матеріалів. Конструкція, розрахунок, проектування / П. І. Чердніченко, В. Г. Бакалов, О. В. Бакалов. – Чернігов : ЧДТУ, 2009. – 141 с.
3. *Шаповал В. М.* Механика элонгационного течения полимеров / В. М. Шаповал. – М. : Физматлит, 2007. – 176 с.
4. *Турчак Л. И.* Основы численных методов / Л. И. Турчак. – М. : Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 320 с.

#### References

1. Cherednichenko, P.I., Bakalov, V.H. & Bakalov, O.V. (2009). Modeliuvannia protsesu rukhu polimeru u ploskoshchilynnii holovtsi [Modeling of process of movement of the polymer in the flat die head]. *Matematychni mashyny i systemy – Mathematical Machines and Systems*, no. 1, pp. 150–158 (in Ukrainian).
2. Cherednichenko, P.I., Bakalov, V.H. & Bakalov, O.V. (2009). *Ploskoshchilynni holovky dlia laminuvannia materialiv. Konstruktsiia, rozrakhunok, projektuvannia* [Flat die heads for laminating materials. Construction, calculation, design]. Chernihiv: Chernihiv State Technological University (in Ukrainian).
3. Shapoval, V.M. (2007). *Mekhanika elongatsionnogo techeniia polimerov* [Mechanics elongational flow polymers]. Moscow: Fizmatlit (in Russian).
4. Turchak, L.I. (1987). *Osnovy chislennykh metodov* [Basics of numerical methods]. Moscow: Gl. red. fiz.-mat. lit. (in Russian).

**Бакалов Валерій Григорович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

**Бакалов Валерий Григорьевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автомобильного транспорта и отраслевого машиностроения, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

**Bakalov Valery** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Motor Transport and Branch Engineer Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenko Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: bakalow@mail.ru

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8602-7778>

Researcher ID: J-1337-2016

**Скрипник Софія Павлівна** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

**Скрипник Софья Павловна** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры автомобильного транспорта и отраслевого машиностроения, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

**Skrynyuk Sofia** – PhD in Technical Sciences, Senior lecturer of the Motor Transport and Branch Engineer Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** fishkina@bk.ru

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-7401-3109>

**Чередніченко Петро Іванович** – доктор технічних наук, професор, Державний науково-випробувальний центр Збройних Сил України (вул. Стрілецька, 1, 14003, м. Чернігів, Україна).

**Чередниченко Петр Иванович** – доктор технических наук, профессор, Государственный научно-испытательный центр Вооруженных Сил Украины (ул. Стрелецкая, 1, 14003, г. Чернигов, Украина).

**Cherednichenko Petr** – Doctor of Technical Sciences, Professor, State Research and Test Center of the Armed Forces of Ukraine (1 Streletska Str., 14003 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** pitercher@ukr.net

**Ігнатенков Олександр Леонідович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

**Игнатенкова Александр Леонидович** – кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильного транспорта и отраслевого машиностроения, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

**Ihnatenkov Alexander** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Motor Transport and Branch Engineer Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** ignatenkov48@mail.ru

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-0770-3847>