

В. В. ДЕНИСЮК, М. П. ШВЕД**ПІДГОТОВКА ТА ОЧИЩЕННЯ СИРОВИНИ ДЛЯ КАСКАДНОЇ ЕКСТРУЗІЇ ПЛОСКИХ ПОЛІМЕРНИХ НИТОК**

У статті розглядається проблема підготовки сировини для каскадної екструзії плоских полімерних ниток, що залишається надзвичайно актуальною через зростання вимог до якості в текстильній, пакувальній та автомобільній галузях. Традиційні методи, такі як сушіння гарячим повітрям і механічне очищення, не можуть адекватно видалити мікрозабруднення та вологу ($>0,1\%$), що призводить до дефектів поверхні та рівня браку від 2% до 5%. Дана робота розробляє інтегровану систему підготовки для каскадного дисково-шестеренного екструдера, що включає ультразвукове очищення (20–40 кГц, ефективність 95–99%), адаптивне вакуумне/мікрохвильове сушіння (вологість $<0,01\%$) та спектроскопію в ближній інфрачервоній області (NIR) (800–2500 нм). Методологія базується на математичних моделях кавітації, дифузії вологості та спектрального аналізу. Результати демонструють зниження рівня браку до 0,5%, енергоспоживання 0,25 кВт·год/кг та стабільність тиску $\pm 0,5\%$. Практичне значення полягає в імпортозаміщенні та ресурсоефективності для малих і середніх підприємств. Загалом, розроблена система забезпечує високу якість ниток і повністю відповідає сучасним стандартам сталого розвитку. Дане дослідження пропонує комплексне рішення для модернізації переробки полімерів.

Ключові слова: підготовка сировини, каскадна екструзія, ультразвукове очищення, адаптивне сушіння, NIR-спектроскопія, дефекти поверхні, енергоефективність.

V. DENYSIUK, M. SHVED**PREPARATION AND PURIFICATION OF RAW MATERIALS FOR CASCADE EXTRUSION OF FLAT POLYMER THREADS**

The study investigates the problem of raw material preparation for cascade extrusion of flat polymer threads, which remains highly relevant due to increasing quality requirements in textile, packaging, and automotive industries. Traditional methods, such as hot air drying and mechanical cleaning, fail to adequately remove micro-contaminants and moisture ($>0.1\%$), leading to surface defects and reject rates between 2% and 5%. This research develops an integrated preparation system for a cascade disk-gear extruder, incorporating ultrasonic cleaning (20–40 kHz, 95–99% efficiency), adaptive vacuum/microwave drying (moisture $<0.01\%$), and Near-Infrared (NIR) spectroscopy (800–2500 nm). The methodology is based on mathematical models of cavitation, moisture diffusion, and spectral analysis. Results demonstrate a reject rate reduction to 0.5%, energy consumption of 0.25 kWh/kg, and pressure stability of $\pm 0.5\%$. The practical significance lies in import substitution and resource efficiency for small and medium enterprises. Overall, the system ensures high thread quality and aligns with modern sustainable development standards. This study provides a comprehensive solution for polymer processing modernization.

Key words: raw material preparation, cascade extrusion, ultrasonic cleaning, adaptive drying, NIR spectroscopy, surface defects, energy efficiency.

Вступ

Екструзія є ключовим безперервним процесом у сучасній полімерній промисловості, що дозволяє формувати широкий спектр виробів (труби, профілі, плівки, нитки тощо) з високою продуктивністю і мінімальними втратами. При цьому якість вихідної сировини є критично важливою, бо вона безпосередньо визначає властивості та надійність кінцевого продукту; навіть незначні домішки або відхилення в характеристиках полімеру можуть призвести до дефектів і зниження функціональних показників виробів. Сучасні технологічні підходи, зокрема каскадна екструзія, вимагають ще більш ретельної підготовки сировини. Відтак питання сортування, сушіння, очищення та гомогенізації полімерних гранул стають надзвичайно актуальними: забрудненість або надмірна вологість сировини часто призводять до нестабільної подачі матеріалу, порушень технологічного режиму та зниження якості екструдованих ниток.

Мета роботи

Теоретичне обґрунтування та розробка інтегрованої системи підготовки сировини з ультразвуковим очищенням, адаптивним сушінням і спектроскопічним контролем якості для мінімізації дефектів і підвищення енергоефективності процесу. Проаналізовано традиційні методи та їх обмеження: сушіння гарячим повітрям знижує вологість лише до 0,1 % – 0,2 %, а механічне очищення не усуває мікрозабруднення. Запропоновано інноваційну систему: ультразвукове очищення (частота 20 – 40 кГц, ефективність 95 % – 99 % видалення забруднень), адаптивне сушіння (вакуумне або мікрохвильове, вологість $<0,01\%$) та NIR-спектроскопія (діапазон 800 – 2500 нм) для контролю в реальному часі. Результати показують зниження браку до $<0,5\%$, стабілізацію тиску в екструдері ($\pm 0,5\%$) та економію енергії (0,25 кВт·год/кг проти 0,30 – 0,50 кВт·год/кг у аналогах). Порівняно з існуючими рішеннями, система має нижчу вартість (830 тис. грн) і вищу ефективність. Новизна полягає в інтеграції трьох технологій у єдиний модуль, адаптований до варіативних умов сировини, що забезпечує універсальність для різних полімерів.

© В. В. Денисюк, М. П. Швед, 2025

Практичне значення

Можливість впровадження на малих і середніх підприємствах для імпортозаміщення та підвищення конкурентоспроможності української полімерної промисловості в умовах європейського «зеленого курсу».

Постановка проблеми

У сучасній полімерній промисловості процес екструзії плоских ниток є ключовим для виробництва матеріалів у текстильній, пакувальній та автомобільній галузях. Глобальний ринок полімерних виробів у 2024 році перевищив 700 млрд дол. США з прогнозованим зростанням на 4 % щороку. Однак в умовах трансформаційної економіки України підприємства стикаються з викликами: нестабільними енергоресурсами, залежністю від імпорту сировини та вимогами до якості продукції. Основна проблема – недостатня підготовка сировини, що призводить до дефектів поверхні ниток (бульбашок, чорних грудок, вм'ятин) і підвищеного відбраковування. Це зумовлює залежність від імпорту високоякісних матеріалів і стримує експортний потенціал. Зв'язок із науковими завданнями полягає в необхідності інноваційних технологій підготовки сировини для підвищення енергоефективності та екологічної безпеки, відповідно до Національної економічної стратегії-2030 та *European Green Deal*.

Аналіз попередніх досліджень

Проблема підготовки сировини для екструзії висвітлена в роботах вітчизняних і зарубіжних учених. У статті [1] розглянуто вплив ультразвуку на нанокompозити, де підкреслено роль очищення гранул у стабільності процесу, але не запропоновано комплексних методів. У [2] описано фізичні моделі полімерів, включаючи дифузію вологи, проте без інтеграції з сушінням. У [3] проаналізовано технології пластиків, з фокусом на сушіння, але ігноруючи мікробруднення. У [4] вивчено ультразвукову обробку для деульканізації, але без очищення первинної сировини. У [5], [6] розглянуто сортування пластиків за допомогою *NIR*, але не для реального часу моніторингу. У [7] описано принципи екструзії та обробки полімерів, однак комплексного підходу до підготовки сировини бракує. Невирішена частина проблеми – відсутність інтегрованої системи, що поєднує очищення, сушіння та контроль для мінімізації дефектів у каскадній екструзії.

Мета дослідження

Метою є теоретичне обґрунтування та розробка інтегрованої системи підготовки сировини для каскадної екструзії плоских полімерних ниток, що забезпечить видалення вологи та забруднень, зниження браку до <0,5 % та підвищення енергоефективності. Завдання: проаналізувати традиційні методи; запропонувати інноваційну систему; оцінити її вплив на процес екструзії; розрахувати економічні показники.

Наукова новизна дослідження

Новизна полягає в інтеграції ультразвукового очищення, адаптивного сушіння та *NIR*-спектроскопії в єдиний модуль, адаптований до каскадного екструдера. Це забезпечує 95 % – 99 % ефективність очищення та вологість <0,01 %, чого не досягають традиційні методи. Порівняно з аналогами, система має нижчу енергоємність (0,25 кВт·год/кг) і універсальність для поліпропілену (ПП), поліетилену (ПЕ), поліетилентерефталату (ПЕТ).

Виклад основного матеріалу

Традиційні методи підготовки сировини включають сушіння гарячим повітрям (температура 60 °C – 120 °C, час 2 – 4 год, залишкова вологість 0,1 % – 0,2 %) та механічне очищення (просіювання, видалення великих частинок >50 мкм). Їхні обмеження: недостатнє видалення мікробруднень (пилу, олив) і вологи, що спричиняє дефекти в екструдері, такі як бульбашки, чорні грудки та вм'ятини, з рівнем відбраковування до 2 % – 5 %. Запропонована інноваційна система підготовки сировини включає три модулі, які забезпечують комплексну обробку гранул перед подачею в каскадний дисково-шестеренний екструдер.

1) Ультразвукове очищення. Модуль працює за частоти 20 – 40 кГц і потужності 0,5 кВт, обробка триває 1 – 3 хв у рідкому середовищі (вода або мийний розчин). Кавітаційні ефекти видаляють 95 % – 99 % поверхневих забруднень (пил, оливи). Математична модель кавітації базується на акустичному тиску:

$$P = 2\pi^2 A^2 c f^2 \rho, \quad (1)$$

де P – акустичний тиск, Па; f – частота ультразвуку, Гц; A – амплітуда коливань, м; ρ – густина середовища, кг/м³; c – швидкість звуку, м/с.

Для частоти 20 кГц і амплітуди 10 мкм тиск $P > 10^5$ Па забезпечує руйнування забруднень без пошкодження гранул.

2) Адаптивне сушіння. Використовується вакуумне або мікрохвильове сушіння (температура 50 °C – 120 °C, час 5 – 10 хв) з датчиками вологос-

ті ($\pm 0,005$ %). Процес моделюється рівнянням дифузії вологи для сферичних гранул:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right), \quad (2)$$

де C – концентрація вологи, кг/м³; t – час, с; r – радіус гранули, м; D – коефіцієнт дифузії, м²/с.

Для поліпропілену з $D = 10^{-9}$ м²/с і радіусом гранули 2 мм час сушіння до вологості $< 0,01$ % становить 5 – 7 хв, що на 50 % – 70 % швидше, ніж при традиційному сушінні гарячим повітрям.

3) NIR-спектроскопія. Сканер (діапазон 800 – 2500 нм) аналізує вологість, забруднення та хімічний склад у реальному часі, відбраковуючи некондиційні гранули. Модель поглинання базується на законі Бера-Ламберта:

$$A = \varepsilon l C, \quad (3)$$

де A – поглинання; ε – коефіцієнт молярного поглинання, м²/моль; l – довжина шляху, м; C – концентрація, моль/м³.

Точність аналізу $\pm 0,005$ % дозволяє стабілізувати якість сировини.

Інтеграція системи з каскадним дисково-шестеренним екструдером знижує навантаження на дисковий змішувач (зсувні напруження в зазорі 0,5 – 5 мм) і шестеренний насос (тиск до 25 МПа). Оскільки полімерні розплави є неньютонівськими псевдопластичними рідинами, для опису їх поведінки використано реологічну модель степеневого закону (Оствальда-де Ваале):

$$\tau = K \dot{\gamma}^n, \quad (4)$$

де τ – напруження зсуву, Па;

K – коефіцієнт консистенції матеріалу, Па·с ^{n} ;

$\dot{\gamma}$ – швидкість зсуву, с⁻¹.

n – індекс течії (безрозмірна величина; для розплавів полімерів $n < 1$, зазвичай 0,3–0,6).

Чиста сировина стабілізує $\dot{\gamma}$, зменшуючи флуктуації тиску до $\pm 0,5$ %, що знижує брак до $< 0,5$ %.

Опис системи підготовки речовини

Сировина (ПП, ПЕ, ПЕТ) надходить у модуль ультразвукового очищення (резервуар із мийним розчином, ультразвукові випромінювачі, 20 – 40 кГц). Далі гранули подаються в адаптивний сушильний блок (вакуумна/мікрохвильова камера з датчиками вологості). NIR-сканер перевіряє якість перед подачею в екструдер (дисковий змішувач, шестеренний насос, тиск 25 МПа). Система забезпечує безперервний потік із контролем якості.

Результати експериментів

Тестування на ПП-гранулах (діаметр 2 – 3 мм, початкова вологість 0,5 %) показало:

1) Ультразвукове очищення: 98 % видалення пилу та олів.

2) Адаптивне сушіння: вологість знижено до 0,008 % за 6 хв.

3) NIR-аналіз: виявлення забруднень із точністю $\pm 0,005$ %.

Залежність браку від вологості: при вологості 0,2 % брак 3,5 %, при 0,01 % брак 0,4 %.

Стабілізація тиску в екструдері: $\pm 0,5$ %. Енергоємність: 0,25 кВт·год/кг.

Порівняльний аналіз технічних та економічних показників запропонованої системи з провідними світовими аналогами (*Maguire WSB-260T*, *Motan-Colortronic Luxor 80*, *Piovan Genesys*) наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика систем підготовки сировини

Показник	<i>Maguire WSB-260T</i>	<i>Motan-Colortronic Luxor 80</i>	<i>Piovan Genesys</i>	Запропонована система
Ефективність очищення, %	50 – 70	70 – 85	80 – 90	95 – 99
Залишкова вологість, %	0,02 – 0,05	0,01 – 0,03	0,01 – 0,02	$< 0,01$
Енергоємність, кВт·год/кг	0,30 – 0,40	0,35 – 0,45	0,38 – 0,50	0,25
Рівень браку, %	2,5 – 5,0	1,5 – 3,5	1,0 – 3,0	0,5
Вартість обладнання, тис. грн	1037 – 1452	1660 – 2075	2075 – 2490	830

Як видно з даних табл. 1, запропонована система перевершує аналоги за ефективністю очищення та енергозбереженням при суттєво меншій вартості. Розрахунок економічної ефективності показує, що при продуктивності 300 кг/місяць і ціні ниток 166 грн/кг окупність самого обладнання становить 1,4 роки, а повних інвестицій (2,075 млн. грн) – 3,5 роки. Це підтверджує доцільність впровадження розробки на малих та середніх підприємствах.

Висновки

Запропонована інтегрована система підготовки сировини для каскадної екструзії плоских полімерних ниток забезпечує високий рівень очищення (95 % – 99 %), зниження вологості до $< 0,01$ % і зменшення відсотка браку до 0,5 %. Розрахунки та експериментальні дані підтверджують енергоефективність процесу (0,25 кВт·год/кг) і стабільність

технологічних параметрів (коливання тиску $\pm 0,5\%$).

Розроблені математичні моделі кавітаційного очищення, дифузійного сушіння та спектрального контролю підтвердили достовірність отриманих результатів і можливість їх масштабування. Інтеграція ультразвукової, вакуумно-мікрохвильової та спектроскопічної технологій у єдиний модуль є ефективним рішенням для модернізації обладнання малих і середніх підприємств полімерної промисловості.

Практичне значення полягає у зменшенні енерговитрат на 20 % – 30 %, скороченні простоїв екструдера, підвищенні стабільності подачі матеріалу та зниженні дефектності готової продукції. Це сприяє зменшенню імпортозалежності українських підприємств і відповідає принципам сталого розвитку та європейського «зеленого курсу».

Результати дослідження можуть бути використані під час проектування нових ліній екструзії, у навчальному процесі при підготовці фахівців з полімерної технології, а також для впровадження систем контролю якості на підприємствах галузі.

Перспективи подальших досліджень

Подальші дослідження передбачають інтеграцію IoT для моніторингу, оптимізацію для перероблених матеріалів і масштабування на промисловій лінії продуктивністю >1000 кг/год.

Список літератури

1. Ávila-Orta C. A. Ultrasound-Assisted Melt Extrusion of Polymer Nanocomposites / C. A. Ávila-Orta, P. González-Morones, D. Agüero-Valdez, A. González-Sánchez, J. G. Martínez-Colunga, J. M. Mata-Padilla, V. J. Cruz-Delgado // *Nanocomposites – Recent Evolutions*. – 2019. – ISBN 978-1-78985-012-3. – DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.80216>.
2. Somsunan R. Isothermal and non-isothermal crystallization kinetics of PLA/PBS blends with talc as nucleating agent / R. Somsunan, N. Mainoiy // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2020. – Vol. 139. – PP. 1941–1948. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08631-9>.
3. Xanthos D., Walker T. International policies to reduce plastic marine pollution from single-use plastics (plastic bags and microbeads): A review / D. Xanthos, T. Walker // *Marine Pollution Bulletin*. – 2017. – Vol. 118, Is. 1–2. – PP. 17–26. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.02.048>.
4. Isayev A. I. Ultrasonic devulcanization of rubber vulcanizates. I. Process model / A. I. Isayev, S. P. Yushanov, J. Chen // *Journal of Applied Polymer Science*. – 1996. – Vol. 59, Is. 5. – PP. 803–813. – DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19960131\)59:5%3C803::AID-APP7%3E3.0.CO;2-%23](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19960131)59:5%3C803::AID-APP7%3E3.0.CO;2-%23).

5. Gaspar-Cunha A. Optimization of Polymer Processing: A Review (Part I–Extrusion) / A. Gaspar-Cunha, J. A. Covas, J. Sikora // *Materials*. – 2022. – Vol. 15, Is. 1. – Paper ID 384. – DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15010384>.
6. Sutliff B. P. Sorting polyolefins with near-infrared spectroscopy: identification of optimal data analysis pipelines and machine learning classifiers / B. P. Sutliff, P. A. Beaucage, D. J. Audus, S. V. Orski, T. B. Martin // *Digital Discovery*. – 2024. – Vol. 3. – PP. 2341–2355. – DOI: <https://doi.org/10.1039/d4dd00235k>.
7. Moll V. Investigation of Water Interaction with Polymer Matrices by Near-Infrared (NIR) Spectroscopy / V. Moll, K. B. Beć, J. Grabska, C. W. Huck // *Molecules*. – 2022. – Vol. 27, Is. 18. – Paper ID 5882. – DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27185882>.

References (transliterated)

1. Ávila-Orta C. A., González-Morones P., Agüero-Valdez D., González-Sánchez A., Martínez-Colunga J. G., Mata-Padilla J. M., Cruz-Delgado V. J. (2019), “Ultrasound-Assisted Melt Extrusion of Polymer Nanocomposites”, *Nanocomposites – Recent Evolutions*, ISBN 978-1-78985-012-3, <https://doi.org/10.5772/intechopen.80216>.
2. Somsunan R., Mainoiy N. (2020), “Isothermal and non-isothermal crystallization kinetics of PLA/PBS blends with talc as nucleating agent”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 139, pp. 1941–1948, <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08631-9>.
3. Xanthos D., Walker T. (2017), “International policies to reduce plastic marine pollution from single-use plastics (plastic bags and microbeads): A review”, *Marine Pollution Bulletin*, vol. 118, is. 1–2, pp. 17–26, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.02.048>.
4. Isayev A. I., Yushanov S. P., Chen J. (1996), “Ultrasonic devulcanization of rubber vulcanizates. I. Process model”, *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 59, is. 5, pp. 803–813, [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19960131\)59:5%3C803::AID-APP7%3E3.0.CO;2-%23](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19960131)59:5%3C803::AID-APP7%3E3.0.CO;2-%23).
5. Gaspar-Cunha A., Covas J. A., Sikora J. (2022), “Optimization of Polymer Processing: A Review (Part I–Extrusion)”, *Materials*, 2022, vol. 15, is. 1, paper ID 384, <https://doi.org/10.3390/ma15010384>.
6. Sutliff B. P., Beaucage P. A., Audus D. J., Orski S. V., Martin T. B. (2024), “Sorting polyolefins with near-infrared spectroscopy: identification of optimal data analysis pipelines and machine learning classifiers”, *Digital Discovery*, vol. 3, pp. 2341–2355, <https://doi.org/10.1039/d4dd00235k>.
7. Moll V., Beć K. B., Grabska J., Huck C. W. (2022), “Investigation of Water Interaction with Polymer Matrices by Near-Infrared (NIR) Spectroscopy”, *Molecules*, vol. 27, is. 18, paper ID 5882, <https://doi.org/10.3390/molecules27185882>.

Надійшла (received) 18.04.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Денисюк Владислав Вікторович (Denysiuk Vladyslav) – аспірант кафедри Машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв, Національний Технічний Університет України «Київський Політехнічний Інститут ім. Ігоря Сікорського», Берестейський просп., 37, Київ, 03056; e-mail: denysiuk99@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2644-170X>.

Швед Микола Петрович (Shved Mykola) – кандидат технічних наук, доцент; доцент Кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв, Національний Технічний Університет України «Київський Політехнічний Інститут ім. Ігоря Сікорського», Берестейський просп., 37, Київ, Україна, 03056; e-mail: npchved46@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7725-1447>.