

МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 678.057.3:678.021.16

В. В. НОВОДВОРСЬКИЙ^{1*}, М. П. ШВЕД²

^{1*}Каф. машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, Київ, Україна, 03056, тел. +38 (096) 040 46 59, ел. пошта novodvorskiyvolodymyr@gmail.com, ORCID 0000-0002-2895-4506

²Каф. машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, Київ, Україна, 03056, тел. +38 (066) 740 25 45, ел. пошта mpchved46@gmail.com, ORCID 0000-0001-7725-1447

Процес гомогенізації розплаву в дисковому екструдері з дозованим живленням

Мета. У цій роботі передбачено розробити фізичну модель процесів гомогенізації в дисковому екструдері з дозованим живленням, а також обрати й обґрунтувати змінні параметри, за допомогою яких можна оцінювати ефективність змішування та керування процесом. **Методика.** Із появою великої кількості легувальних добавок, наповнених і композиційних матеріалів, виникає необхідність у безперервному контролі й керуванні процесом гомогенізації розплаву. У класичних черв'ячних екструдерах процеси живлення, плавлення, гомогенізації та створення тиску взаємопов'язані, їх запускає одночасно один робочий орган – черв'як, що унеможливує керування окремо кожним процесом із метою їх оптимізації. У таких випадках використовують каскадні схеми екструзії, де процес поділяється на окремі підпроцеси чи їх групи з можливістю автономного керування ними. **Результати.** Описано схему каскадного дисково-шестеренного екструдера, де як розплавлювач-гомогенізатор використано дисковий екструдер із дозованим живленням, а для створення тиску та дозування використано шестеренний насос. Обрано та обґрунтовано змінні параметри дискового екструдера для регулювання ефективності змішування. Проаналізовано компоненти швидкості та їх співвідношення для різних ділянок зони гомогенізації. Обґрунтовано доцільність використання дискового екструдера як розплавлювача-гомогенізатора в каскадних схемах екструзії. Наголошено на адекватності використання індексу змішування у вигляді температурної неоднорідності. Описано зону гомогенізації у вигляді чотирьох окремих підзон та зміни накопиченої деформації зсуву вздовж кожної підзони, а також можливість їх регулювання. **Наукова новизна.** Уперше розроблено й описано гідродинамічну модель процесів у зоні гомогенізації дискового екструдера з дозованим живленням. **Практична значимість.** Обґрунтовано можливість регулювання швидкісного поля в зоні гомогенізації дискового екструдера, що дозволяє керувати ефектом змішування безпосередньо в процесі екструзії. Можливість вибору оптимального режиму роботи зони гомогенізації дозволяє отримувати розплав заданої якості за мінімальних витрат енергії.

Ключові слова: екструзія; дисковий екструдер; якість розплаву; температурна однорідність; гомогенізація

Вступ

До кінця минулого століття під час екструзії полімерів основним показником, на який орієнтувалися виробники, було збільшення продуктивності обладнання. Як раніше, так і зараз замало уваги приділяють гомогенності розплаву та її впливу на енергетичні показники обладнання й фізико-механічні характеристики виробів.

Одношнекові екструдери найбільш поширені в промисловості. За необхідності збільшувати продуктивність в одночерв'ячних екструдерах збільшують швидкість обертання черв'яка, але за великої швидкості обертання якість розплаву погіршується [10], навіть визначено критичну швидкість, після якої якість розплаву не прийнятна, зокрема через надмірну дисипацію енергії [7, 11].

МАШИНОБУДУВАННЯ

Для поліпшення якості розплаву збільшували довжину черв'яка від 20 до 40 його діаметрів, застосовували динамічні чи статичні змішувальні елементи чи взагалі повністю заміняли робочий орган.

Останнім часом із появою великої кількості легувальних добавок, наповнених і композиційних матеріалів виникає необхідність у безперервному контролі й керуванні процесом гомогенізації розплаву. У класичних черв'ячних екструдерах процеси живлення, стискання, плавлення, гомогенізації та створення тиску взаємопов'язані, їх запускає одночасно в різних місцях один робочий орган – черв'як, що унеможливає оптимізацію цих процесів. У таких випадках використовують каскадні схеми екструзії [3, 5], за яких цей процес поділяється на окремі підпроцеси чи їх групи з можливістю автономного керування ними.

На рис. 1 зображена схема каскадного дисково-шестеренного екструдера [4], на який виділено в окремі автономно керовані, незалежні такі операції:

- дозування сипкого матеріалу;
- живлення, попереднє стискання, плавлення та гомогенізація розплаву;
- створення кінцевого тиску та дозування розплаву.

Для виконання цих операцій на першій стадії як розплавлювач-гомогенізатор використовують дисковий екструдер із дозованим живленням, який працює в адіабатичному режимі й забезпечує високу гомогенність розплаву, але не може створювати значний тиск і рівномірність подачі розплаву, які необхідні для формування виробів.

Тому на другій стадії встановлюють об'ємний дозувальний шестеренний насос з жорсткою напірною характеристикою.

Особливістю такого екструдера є те, що дисковий розплавлювач-гомогенізатор працює за неповного заповнення гвинтової нарізки на початковій ділянці, що дозволяє регулювати термомеханічне навантаження на полімер за рахунок можливості зміни частоти обертання диска в діапазоні $\pm 20\%$ від номінального значення та висоту зазору в зоні гомогенізації (ЗГ) в діапазоні 1–5 мм за незмінної продуктивності, яку забезпечує шнековий дозатор.

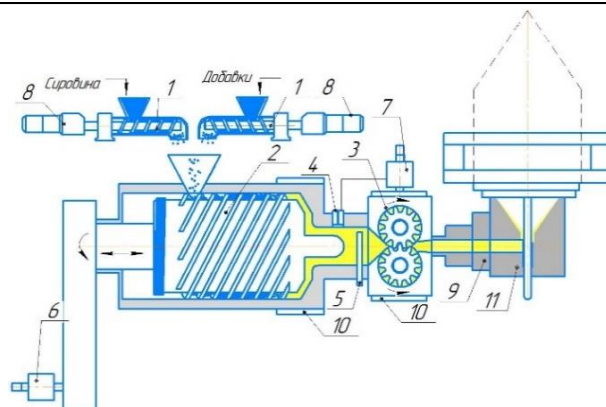


Рис. 1. Схема каскадного дисково-шестеренного екструдера:
1 – шнековий дозатор; 2 – дисковий екструдер;
3 – шестеренний насос; 4 – компенсатор;
5 – гребінчаста термопара; 6, 7, 8 – приводи обертючих органів пристроїв екструдера;
9 – фільтр; 10 – нагрівач; 11 – формувальний інструмент

Fig. 1. Scheme of a cascade disk-gear extruder:
1 – screw dispenser; 2 – disk extruder; 3 – gear pump;
4 – compensator; 5 – comb thermocouple; 6, 7, 8 – drives of rotating bodies of the extruder devices; 9 – filter; 10 – heater; 11 – molding tool

Використання шестеренного насоса, який установлюють між дисковим екструдером і формувальним інструментом, завдяки жорсткій напірній характеристиці дозволяє створювати високий тиск, практично повністю згладити його пульсацію і стабілізувати коливання продуктивності на виході з формувального інструменту.

Для оцінки ефективності змішування використовують в основному статистичні методи й різні критерії. Чутливим індексом якості змішування є відношення генеральної дисперсії до експериментальної.

Якість змішування також оцінюють різними статистичними методами, які показані в роботі [9]. Оцінка ефективності змішування за вищезазначеними критеріями – це трудомісткий, тривалий і малоприйнятний метод у разі безперервної екструзії полімерів.

У публікації [13] вказано, що оцінювати ефективність змішування під час екструзії полімерів можна за критерієм температурної неоднорідності розплаву, що адекватно корелює з іншими критеріями, які використовують для оцінювання ефективності змішування.

Можливість безперервного сканування температурного поля в перерізі потоку розплаву за допомогою багатоточкової термопари з подаль-

МАШИНОБУДУВАННЯ

шим оцінюванням неоднорідності розплаву технічно не складна задача, але ще недостатньо досліджена.

Мета

Основною метою роботи є опис фізичної моделі процесів гомогенізації в дисковому екструдері в разі дозованого живлення з можливістю регулювання термомеханічного навантаження на розплав змінюючи частоту обертання диска та величину робочих зазорів при незмінній продуктивності, оскільки однорідність розплаву залежить від режиму роботи екструдера і є одним з ключових параметрів, що впливають на якість розплаву і виробів з нього.

Методика

Однорідність розплаву має важливе значення для належного проведення будь-якого процесу переробки полімерних матеріалів.

Для кращого оцінювання процесу змішування прийнято використовувати такі взаємопов'язані поняття, як ефективність та інтенсивність змішування. Під час гомогенізації розплавів полімерів доцільно використовувати залежність температурної неоднорідності від накопичених деформацій, для визначення яких необхідно знати швидкісні поля в ЗГ [6, 12].

На рис. 2 подано класичний дисковий екструдер із дозованим живленням, що містить дозатори 1, корпус 2 та розташований у ньому диск 3, який складається із трьох послідовно розташованих зон завантаження і плавлення (завантажувально-пластикувальна зона (ЗПЗ) – у вигляді багатоканальної гвинтової нарізки, та ЗГ – у вигляді набору кільцевих каналів різної форми та геометрії).

Процес дискової екструзії в разі дозованого живлення відбувається таким чином: матеріал і добавки у вигляді гранул дозуються в багатоканальну гвинтову нарізку (ЗПЗ), витки нарізки поступово заповнюються гранулами, які під дією сил тертя переміщуються на вихід ЗПЗ, створюючи необхідний тиск, що забезпечує рух матеріалу вздовж дискового екструдера. Унаслідок дисипації енергії гранули нагріваються та плавляться з утворенням суцільної плівки розплаву на виході із ЗПЗ, у якій гранули доплавляються. Оскільки на диску розташована багатоканальна

нальна гвинтова нарізка, то в кожній із них окремо відбуваються вищенаведені процеси завантаження та плавлення. Унаслідок зміни геометрії каналу, форми й розмірів гранул розплав із менших гранул має вищу температуру, а з більших – значно нижчу. Тому в ЗГ з кожного із гвинтових каналів потрапляє температурно, в'язкісно і механічно неоднорідний розплав.

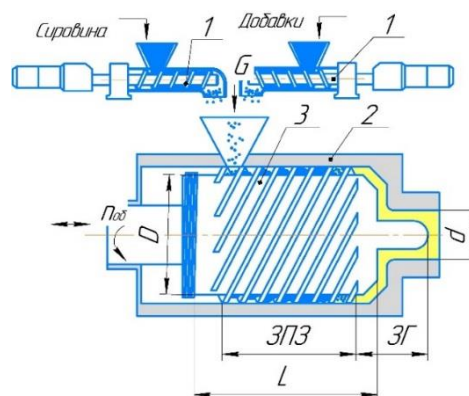


Рис. 2. Схема дискового екструдера з дозованим живленням:

1 – шнекові дозатори; 2 – корпус; 3 – диск екструдера

Fig. 2. Schematic of a metered-discharge disk extruder:

1 – screw metering devices; 2 – housing; 3 – extruder disk

Для усереднення цих показників на виході ЗПЗ застосовують дисковий динамічний змішувач, так звану ЗГ, яка складається з чотирьох підзон з різною конфігурацією та геометричними параметрами рис. 3.

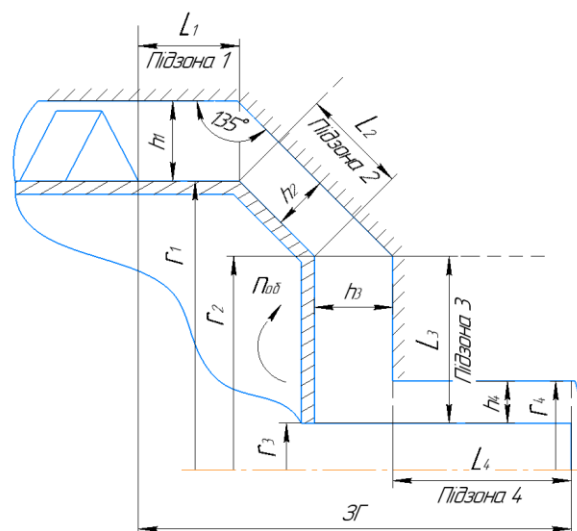


Рис. 3. Зона гомогенізації дискового екструдера

Fig. 3. The homogenization zone of a disk extruder

МАШИНОБУДУВАННЯ

Перша підзона являє собою горизонтальний кільцевий циліндричний канал довжиною L_1 та висотою h_1 .

У другій підзоні розплав полімеру рухається в кільцевому конусному каналі, що сходиться, довжиною L_2 і висотою h_2 .

Третя підзона являє собою плоско-щілинний канал довжиною L_3 і шириною h_3 .

Четверта підзона становить горизонтальний кільцевий циліндричний канал довжиною L_4 та висотою h_4 .

Розплави полімерів – це рідини з великою в'язкістю, тому течія розплаву в ЗГ відбувається в ламінарному режимі, в основному за рахунок надлишкового тиску, що створюється в ЗПЗ. Змішування в цій зоні відбувається за рахунок безперервної багаторазової зміни швидкісних полів у кожній із послідовно розташованих підзон, де розтягуються і стискаються об'єми розплаву. Рух розплаву в ЗГ можна подати у вигляді двох складових: тангенціальної, де розплав рухається за рахунок в'язкісного тертя й має прямолінійний профіль (течія Куетта), та поздовжньої, де розплав рухається внаслідок різниці тисків і має параболічний профіль (течія Пуазейля). Надлишковий тиск, що створюється гвинтовою нарізкою ЗПЗ, забезпечує рух розплаву вздовж ЗГ, де він переймає швидкість поверхонь стінок корпусу та диска. Оскільки поверхня корпусу нерухома, то швидкість розплаву на ній дорівнює нулю, а на рухомій поверхні диска швидкість розплаву дорівнює коловій швидкості диска.

Знання швидкісних полів є ключовим для визначення накопичених зсувних деформацій, від яких залежить температурна однорідність розплаву, тобто ефективність змішування [1].

Результати

У першій підзоні за рахунок великого діаметра диска, порівняно з черв'ячними екструдерами, розплав рухається з максимальною тангенціальною та мінімальною поздовжньою швидкостями, які є незмінними вздовж усієї підзони. Регулювання накопиченої деформації зсуву в цій підзоні можливе лише завдяки зміні швидкості обертання диска.

По мірі течії рідини в другій підзоні зменшується як внутрішній, так і зовнішній діаметри

кільцевого конічного каналу. Відповідно, зменшується тангенціальна складова швидкості. Оскільки за дозованого живлення продуктивність незмінна, а площа прохідного перерізу конусного каналу зменшується вздовж другої підзони, поздовжня швидкість розплаву збільшується. У цій підзоні також виникає ефект Вайсенберга, що частково компенсує падіння тиску.

Змінити зсувні деформації та співвідношення між складовими швидкості в другій підзоні можна зміною частоти обертання диска чи висоти зазору або обома параметрами одночасно.

Як і в другій підзоні, уздовж третьої підзони зі зменшенням діаметра площа прохідного перерізу каналу зменшується за сталої продуктивності. Тому поздовжня швидкість розплаву вздовж підзони збільшується і має максимальне значення, у той час як тангенціальна складова швидкості зменшується і має мінімальне значення вздовж усієї ЗГ. У цій підзоні вплив ефекту Вайсенберга більший ніж у другій підзоні, і він майже повністю компенсує падіння тиску в третій підзоні. Таким чином, співвідношення між тангенціальною та поздовжньою швидкостями змінюються від максимального значення в першій підзоні до мінімального значення в третій підзоні.

Четверту підзону умовно можна назвати зоною стабілізації, де висоту каналу не регулюють і вибирають таким чином, щоб складові швидкості були співмірними.

Попередньо встановлено, що в разі зміни швидкості обертів та висоти зазорів у ЗГ змінюється середня температура розплаву. Це вказує на можливість регулювання в дисковому екструдері з дозованим живленням не тільки гомогенності, але й середньої температури розплаву [4].

Температурна та механічна однорідності взаємопов'язані. У разі досягнення температурної однорідності можна стверджувати про досягнення механічної однорідності і, відповідно, високої якості розплаву [2, 7, 8, 11, 14]. Змішування – це рівномірний розподіл компонентів суміші чи температури в об'ємі. Такий розподіл призводить до вирівнювання температури розплаву в перерізі потоку.

Попередньо проведені дослідження показали, що в дисковому екструдері з дозованим живленням хорошу регульовану ефективність

МАШИНОБУДУВАННЯ

змішування забезпечує можливість зміни співвідношення між компонентами швидкості за допомогою регулювання, у певних діапазонах, частоти обертання диска та висоти зазорів за тих же значень накопичених сумарних деформацій зсуву, як і в іншому полімерпереробному обладнанні з закритим об'ємом, тобто тоді, коли вони перевищують 2 000 одиниць [1].

Наукова новизна та практична значимість

Уперше розроблено фізичну модель процесів гомогенізації в дисковому екструдері з дозованим живленням, обрано та обґрунтовано параметри для регулювання зсувних деформацій. Установлено, що оцінювати ефективність змішування можна за температурною неоднорідністю розплаву, яку регулюють у певних межах безпосередньо в процесі роботи екструдера.

Висновки

Наведено схему каскадної дисково-шестеренної екструзії, де як розплавлювач-гомогенізатор використано дисковий екструдер із дозованим живленням, який працює в адіабатичному

режимі й забезпечує високу гомогенність розплаву, але не може створювати значний тиск і рівномірність подачі розплаву, які необхідні для формування виробів.

Тому на другій стадії для усунення вказаних недоліків установлюють об'ємний дозувальний шестеренний насос із жорсткою напірною характеристикою.

Особливістю такого екструдера є те, що дозоване живлення дискового розплавлювача-гомогенізатора забезпечує неповне заповнення гвинтової нарізки на початковій ділянці, що дозволяє регулювати термомеханічне навантаження на полімер за рахунок можливості зміни частоти обертання диска в діапазоні ± 20 % від номінального значення та висоти зазору в ЗГ за рахунок переміщення диска в діапазоні 1–5 мм у разі незмінної продуктивності, яку забезпечує шнековий дозатор. Адекватність оцінювання ефективності змішування за температурною неоднорідністю значно спрощує оцінку ефективності й дозволяє її регулювати безпосередньо під час технологічного процесу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мікульонок І. О. *Обладнання і процеси переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини* : монографія. Київ : ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2009. 265 с.
2. Новодворський В. В., Швед М. П. Оцінювання якості розплаву при екструзії полімерів. *Вісник НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського»*. Серія : Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2021. № 4. С. 9–14. DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.4.2021.248854>
3. Степанюк Д. А., Швед М. П., Швед Д. М. Черв'ячно-шестеренний екструдер при переробці полімерних матеріалів. *ScienceRise*. 2015. Том 3, № 2 (8). С. 31–34. DOI: <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2015.38997>
4. Швед М. П., Швед Д. М., Бояркін О. О. Розплавлювач-гомогенізатор розплавів полімерів на базі дискового екструдера. *Молодий вчений*. 2017. № 3 (43). С. 769–771.
5. Швед М. П., Швед Д. М., Луценко І. В., Богатир А. С. Переваги використання каскадних схем та дозуючих шестеренних насосів при екструзії полімерів. *Технологический аудит и резервы производства*. 2013. № 1/2 (9). С. 21–24.
6. Тор-Святек А., Красінський В., Дулебова Л. Аналіз ефективності процесу екструзії пористого поліетилену. *Хімія, технологія речовин та їх застосування*. 2014. № 787. С. 434–440.
7. Abeykoon C., Kelly A. L., Martin P. J., Li K. Dynamic modelling of die melt temperature profile in polymer extrusion. *52nd IEEE Conference on Decision and Control (Firenze, 10-13 December 2013)*. Firenze, 2013. P. 2550–2555. DOI: <https://doi.org/10.1109/cdc.2013.6760264>
8. Abeykoon, C., Martin, P. J., Kelly, A. L., Li, K., Brown, E. C., Coates, P. D. Investigation of the temperature homogeneity of die melt flows in polymer extrusion. *Polymer Engineering & Science*. 2014. Vol. 54. Iss. 10. P. 2430–2440. DOI: <https://doi.org/10.1002/pen.23784>
9. Cowden D. J. *Statistical methods in quality control*. Prentice-Hall, 1957. 727 p.

МАШИНОБУДУВАННЯ

10. Domingues N., Gaspar-Cunha A., Covas J. A. Global mixing indices for single screw extrusion. *International Journal of Material Forming*. 2008. Vol. 1, Suppl 1. P. 723–726.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12289-008-0317-4>
11. Rauwendaal C. Effective troubleshooting of extrusion problems. *AIP Conference Proceedings*. Vol. 1779, No. 1. P. 030021. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4965491>
12. Rauwendaal C. *Polymer extrusion*. Hanser Publications, 2014. 934 p.
13. Wilczyński K. A method for estimation of polymer melt temperature fluctuation in a single screw extrusion process. *Polymer Engineering & Science*. 1988. Vol. 28. Iss. 7. P. 429–433.
DOI: <https://doi.org/10.1002/pen.760280705>
14. Wood A. K. Determination of melt temperature and velocity profiles in flowing polymer melts. *8o Congresso Brasileiro de Polimeros*. 2003. P. 1378–1381.

V. V. NOVODVORSKYI^{1*}, N. P. SHVED²

^{1*}Department of Chemical Engineering and Oil Refining Industry, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Peremohy Ave., 37, Kyiv, Ukraine, 03056, tel. +38 (096) 040 46 59, e-mail novodvorskiyvolodymyr@gmail.com, ORCID 0000-0002-2895-4506

²Department of Chemical Engineering and Oil Refining Industry, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Peremohy Ave., 37, Kyiv, Ukraine, 03056, tel. +38 (066) 740 25 45, e-mail npchved46@gmail.com, ORCID 0000-0001-7725-1447

The Process of Melt Homogenization in a Metered-Discharge Disk Extruder

Purpose. This paper aims to develop a physical model of the homogenization process in a metered-discharge disk extruder, as well as to select and justify the variable parameters that can be used to evaluate the efficiency of mixing and process control. **Methodology.** With the advent of a large number of alloying additives, filled and composite materials, there is a need for continuous monitoring and control of the melt homogenization process. In classical worm extruders, the processes of feeding, melting, homogenization, and pressure generation are interconnected and are triggered simultaneously by a single working body, the worm, which makes it impossible to control each process separately to optimize them. In such cases, cascade extrusion schemes are used, where the process is divided into separate subprocesses or groups of them with the ability to control them independently. **Findings.** The scheme of a cascade disk-gear extruder is described, where a metered-powered disk extruder is used as a melt-homogenizer, and a gear pump is used to create pressure and dosing. The variable parameters of the disk extruder for adjusting the mixing efficiency are selected and substantiated. The speed components and their ratios for different parts of the homogenization zone are analyzed. The expediency of using a disk extruder as a melt-homogenizer in cascade extrusion schemes is substantiated. The adequacy of using the mixing index in the form of temperature inhomogeneity is emphasized. The homogenization zone in the form of four separate subzones and changes in the accumulated shear strain along each subzone, as well as the possibility of their regulation, are described. **Originality.** For the first time, a hydrodynamic model of processes in the homogenization zone of a metered-discharge disk extruder was developed and described. **Practical value.** The possibility of adjusting the velocity field in the homogenization zone of a disk extruder has been substantiated, which allows controlling the mixing effect directly during the extrusion process. The possibility of selecting the optimal mode of operation of the homogenization zone makes it possible to obtain a melt of a given quality with minimal energy consumption.

Keywords: extrusion; disk extruder; melt quality; temperature homogeneity; homogenization

REFERENCES

1. Mikulionok, I. O. (2009). *Obladnannia i protsesy pererobky termoplastychnykh materialiv z vykorystanniam vtorynnoi syrovyny: monohrafiia*. Kyiv: IVTs “Vydavnytstvo «Politekhnik»”. (in Ukrainian)
2. Novodvorskyi, V., Shved, M., & Shved, D. (2021). Evaluation of melt quality during polymer extrusion. *Proceedings of the NTUU «Igor Sikorsky KPI». Series: Chemical Engineering, Ecology and Resource Saving*, 4, 9-14. DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.4.2021.248854> (in Ukrainian)
3. Stepanjuk, D. A., Shved, M. P., & Shved, D. M. (2015). The worm-gear extruder during processing the polymeric materials. *ScienceRise*, 3(2(8)), 31. DOI: <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2015.38997> (in Ukrainian)

МАШИНОБУДУВАННЯ

4. Shved, M. P., Shved, D. M., & Bojarkin, O. O. (2017). Smoothing agent homogenizer of polymer melts on the basis of a disk extruder, *Young Scientist*, 3(43), 769-771. (in Ukrainian)
5. Shved, M. P., Shved, D. M., Lucenko, I. V., & Boghatyr, A. S. (2013). Pervahy vykorystannia kaskadnykh skhem ta dozuiuchykh shesterennykh nasosiv pry ekstruzii polimeriv. *Technology audit and production reserves*, 1/2(9), 21-24. (in Ukrainian)
6. Tor-Svjatek, A., Krasinskyj, V., & Dulebova, L. (2014). Analiz efektyvnosti procesu ekstruziji porystogho polietyleny. *Chemistry, technology and application of substances*, 787, 434-440.
7. Abeykoon, C., Kelly, A. L., Martin, P. J., & Kang Li. (2013). Dynamic modelling of die melt temperature profile in polymer extrusion. In *52nd IEEE Conference on Decision and Control* (pp. 2550-2555). DOI: <https://doi.org/10.1109/cdc.2013.6760264> (in English)
8. Abeykoon, C., Martin, P. J., Kelly, A. L., Li, K., Brown, E. C., & Coates, P. D. (2013). Investigation of the temperature homogeneity of die melt flows in polymer extrusion. *Polymer Engineering & Science*, 54(10), 2430-2440. DOI: <https://doi.org/10.1002/pen.23784> (in English)
9. Cowden, D. J. (1957). *Statistical methods in quality control*. Prentice-Hall. (in English)
10. Domingues, N., Gaspar-Cunha, A., & Covas, J. A. (2008). Global Mixing Indices for Single Screw Extrusion. *International Journal of Material Forming*, 1(S1), 723-726. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12289-008-0317-4> (in English)
11. Rauwendaal, C. (2016). Effective troubleshooting of extrusion problems. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1779, No. 1, pp. 030021). DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4965491> (in English)
12. Rauwendaal, C. (2014). *Polymer extrusion*. Hanser Publications. (in English)
13. Wilczyński, K. (1988). A method for estimation of polymer melt temperature fluctuation in a single screw extrusion process. *Polymer Engineering and Science*, 28(7), 429-433. DOI: <https://doi.org/10.1002/pen.760280705> (in English)
14. Wood A.K., (2003), Determination of melt temperature and velocity profiles in flowing polymer melts. *8o Congresso Brasileiro de Polimeros*, 1378-1381. (in English)

Надійшла до редколегії: 27.05.2022

Прийнята до друку: 26.09.2022