

ХІМІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК [678.057.3:62-216:536.2]-048.35

ВИТВИЦЬКИЙ В. М.*, ВИТВИЦЬКИЙ ВЛАД. М., МІКУЛЬОНОК І. О.,
СОКОЛЬСЬКИЙ О. Л., ШИЛОВИЧ Т.Б.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ МОДЕРНІЗОВАНОГО КОРПУСА ОДНОЧЕРВ'ЯЧНОГО ЕКСТРУДЕРА

Предмет дослідження – енергоефективність процесу екструзії полімерів в одночерв'ячному екструдері для перероблення полімерних матеріалів.

Мета досліджень – вдосконалення конструкції завантажувальної секції циліндра одночерв'ячного екструдера, яка полягає в розміщенні термопасти в проміжку між сполучними циліндричними поверхнями змінної циліндричної гільзи й каналу корпусу завантажувальної секції, що знижує термічний опір стінки секції та поліщує теплопередачу від перероблюваного матеріалу до охолоджувальної води, а отже дає змогу зменшити її витрату.

Для підтвердження енергоефективності запропонованого технічного рішення було виконано тепловий розрахунок базової й модернізованої конструкції у модулі Steady Thermal програмного комплексу Ansys. Аналіз проведених розрахунків показав, що застосування термопасти замість повітря в проміжку між корпусом і змінною циліндричною гільзою знижує термічний опір стінки циліндра на 9 %, при цьому також вирівнюється температурне поле по всій завантажувальній секції циліндра. Крім того, варто зазначити, що тип використовуваної термопасти майже не впливає на термічний опір стінки секції, тому в пропонованій конструкції можна застосовувати термопасту низької вартості.

Ключові слова: черв'ячний екструдер, завантажувальна секція, термічний опір, модернізація, енергоефективність.

DOI: 10.20535/2617-9741.4.2023.294323

*Corresponding author: vytytskyi.v@gmail.com

Received 10 September 2023; Accepted 05 October 2023

Постановка проблеми. Галузь виробництва виробів із полімерних матеріалів є однією з провідних галузей промисловості розвинених країн світу. Полімери застосовуються майже в усіх сферах виробництва й споживання, при цьому попит на вироби із полімерів і пластмас у машинобудуванні, будівництві, транспорті, сільському господарстві й медицині стабільно зростає [1–4].

Одним з найбільш використовуваних видів обладнання для перероблення полімерних матеріалів є екструзійне обладнання, а найбільш широко поширеним типом екструзійного обладнання – одночерв'ячні екструдери [5–14]. Принцип роботи одночерв'ячного екструдера полягає в надходженні полімерних гранул з бункера до утвореного корпусом і черв'яком робочого каналу, в якому під дією обертового черв'яка й відповідного температурного режиму гранули поступово плавляться, а одержани розплав продавлюється крізь формувальну головку з утворенням екструдату певного поперечного перерізу [15–18].

Проте, незважаючи на широке використання одночерв'ячних екструдерів традиційної конструкції, постійно з'являються нові полімерні матеріали, які потребують удосконалення їх конструктивно-технологічного оформлення. Одним з недоліків базової конструкції одночерв'ячного екструдера є значна витрата води для охолодження завантажувальної секції корпусу, що використовується для підтримки необхідного температурного режиму і цій секції [19–21].

Аналіз попередніх досліджень. Однією з функціональних зон одночерв'ячних екструдерів є зона завантаження вихідної сировини, насамперед гранул, порошку або пластівців (у класичному

одночерв'ячному екструдері послідовно розташовано три функціональні зони: живлення, плавлення й гомогенізації; іноді між зонами плавлення й гомогенізації додається ще зона дегазації [22–24]).

Завантажувальна секція забезпечує подавання вихідної сировини в робочий канал екструдера, де вона захоплюється черв'яком, транспортується й стискається з поступовим генеруванням надлишкового тиску для подальшого проштовхування перероблюваного матеріалу крізь інші функціональні зони екструдера та екструзійну головку. Для запобігання передчасного плавлення полімеру під час його проходження завантажувальної секції її інтенсивно охолоджують проточною водою, що рухається спіральним каналом зовні корпусу завантажувальної секції. При цьому внаслідок інтенсивного зношування поверхні робочого каналу корпусу в його циліндричному каналі розміщують знімну циліндричну гільзу [5].

Також існує спосіб складання завантажувальної секції циліндра одночерв'ячного екструдера, що включає розміщення знімної циліндричної гільзи в циліндричному каналі корпусу завантажувальної секції з наступною фіксацією зазначеної гільзи від провороту та осьового переміщення за допомогою фіксатора [25]. Зазначений спосіб у разі потреби дає змогу швидко замінити знімну циліндричну гільзу, проте його реалізація передбачає наявність повітряного проміжку між сполучними циліндричними поверхнями знімної циліндричної гільзи та корпусу завантажувальної секції, що збільшує термічний опір теплопередачі від перероблюваного матеріалу до охолоджувальної води, а отже призводить до збільшення її витрати.

Загальною науковою проблемою процесу живлення черв'ячного екструдера полімерною сировиною є велика витрата охолоджувальної води на підтримку необхідного температурного режиму, при цьому не вирішеною частиною наукової проблеми є високий термічний опір стінки циліндра, спричинений наявністю повітряного проміжку між гільзою і корпусом циліндра, що збільшує термічний опір теплопередачі від перероблюваного матеріалу до охолоджувальної води [26, 27].

Метою статті є підвищення енергоефективності способу складання завантажувальної секції циліндра одночерв'ячного екструдера, у якому його нова реалізація забезпечує наявність теплопровідного матеріалу в проміжку між сполучними циліндричними поверхнями знімної циліндричної гільзи й каналу корпусу завантажувальної секції, що знижує термічний опір теплопередачі від перероблюваного матеріалу до охолоджувальної води, а отже дає змогу зменшити її витрату.

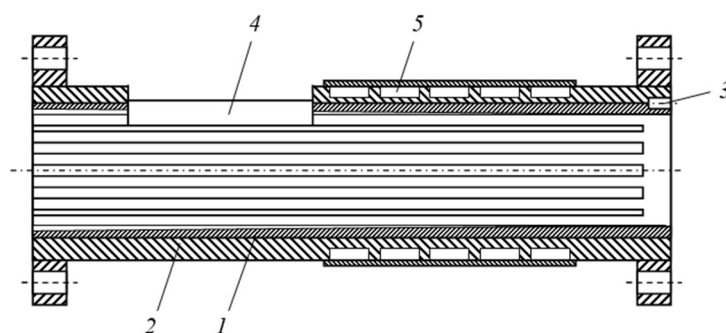
Виклад основного матеріалу. Пропоноване вдосконалення складання завантажувальної секції циліндра одночерв'ячного екструдера полягає в такому. Запропоновано вдосконалений спосіб складання завантажувальної секції циліндра одночерв'ячного екструдера, що включає розміщення знімної циліндричної гільзи в циліндричному каналі корпусу завантажувальної секції з наступною фіксацією зазначеної гільзи від провороту та осьового переміщення за допомогою фіксатора, де новим конструктивним рішенням буде нанесення термопасти перед розміщенням знімної циліндричної гільзи в циліндричному каналі корпусу завантажувальної секції щонайменше на одну з їхніх сполучних циліндричних поверхонь [28].

Нанесення щонайменше на одну зі сполучних циліндричних поверхонь циліндричної гільзи й циліндричного каналу корпусу термопасти дає змогу заповнити порожнину з повітрям термопастою в кільцевому проміжку між гільзою й каналом корпусу. Оскільки коефіцієнт теплопровідності повітря за температури 20 °C становить 0,026 Вт/(м·К), а термопасти – не менше 4 Вт/(м·К) [29], то термічний опір теплопровідності зазначеного проміжку зменшується щонайменше в 150 разів.

Сутність запропонованого вдосконалення пояснюється ескізом (рис. 1), на якому зображено поздовжній розріз завантажувальної секції одночерв'ячного екструдера. Спочатку на знімну циліндричну гільзу 1 та/або на поверхню циліндричного каналу корпусу 2 наносять термопасту. Після цього знімну циліндричну гільзу 1 розміщують у циліндричному каналі корпусу 2 завантажувальної секції, після чого зазначену циліндричну гільзу 1 фіксують від провороту та осьового переміщення за допомогою фіксатора, наприклад, декількох штифтів 3.

Під час роботи екструдера перероблюваний матеріал, що надходить із завантажувального бункера крізь вікно 4 корпусу 2, захоплюється черв'яком (на рис. 1 не показано) і транспортується вздовж знімної циліндричної гільзи 2. Внаслідок тертя матеріалу по поверхнях знімної циліндричної гільзи 2 та черв'яка виділяється теплота, яку відводить охолоджувальна вода, що рухається спіральним каналом 5 корпусу 2 завантажувальної секції.

Такий спосіб складання корпусу екструдера дає змогу замінити повітря термопастою в кільцевому проміжку між циліндричною гільзою й циліндричним каналом корпусу, знизити термічний опір теплопередачі від перероблюваного матеріалу до охолоджувальної води і, як наслідок, зменшити витрату зазначеної води.



1 – знімна циліндрична гільза; 2 – корпус; 3 – штифт; 4 – вікно для надходження матеріалу;
5 – спіральний канал для руху охолоджувальної води

Рис. 1 – Поздовжній розріз завантажувальної секції одночерв’ячного екструдера

Для перевірки енергоефективності запропонованого рішення, було виконано розрахунок модернізованої конструкції на теплопровідність у модулі Steady Thermal програмного комплексу Ansys [30].

Матеріали та методи досліджень. При проведенні розрахунків як перероблюваний полімер було взято полівінілхлорид марки SorVyl G 2171/9005 11/01 (ПВХ) [31]. Матеріал виконання корпусу, гільзи, завантажувальної воронки та бічних фланців – легована сталь (табл. 1 [32]).

Таблиця 1 – Задані властивості матеріалу легована сталь

Модуль пружності, МПа	E	$2,1 \cdot 10^5$
Коефіцієнт Пуассона	μ	0,28
Густина, кг/м ³	ρ	7700
Границя текучості, МПа	σ_T	620

На рис. 2 показано розроблену 3D-модель модернізованого корпусу, виконану можливостями Ansys у модулі Design Modeller і розбиту на скінченні елементи з розміром комірки 2 мм. При цьому теплопровідну вставку між корпусом і гільзою відповідно до розробленого патенту і для перевірки заявлених властивостей задавали або як повітря з теплопровідністю 0,026 Вт/(м·К), або як термопасту з теплопровідністю мінімум 4 Вт/(м·К) (рис. 3).

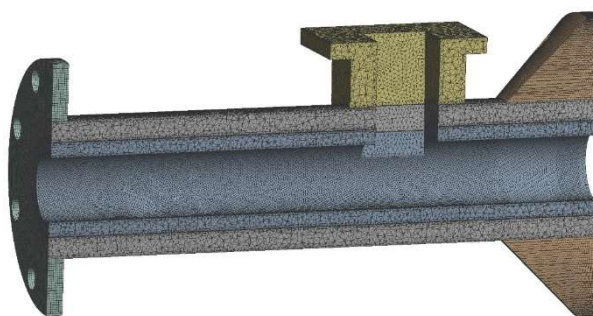
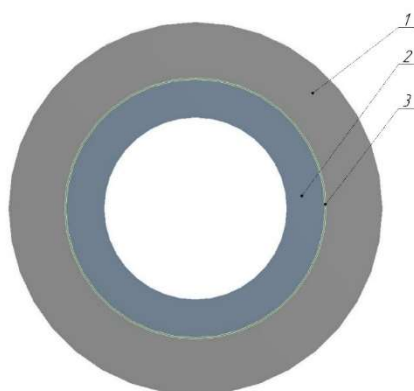


Рис. 2 – Поздовжній розріз 3D-моделі модернізованої конструкції корпусу, розбитої на скінченні елементи

Граничні умови. Температура всередині робочої камери (всередині корпусу) з метою уникнення передчасного розплавлення матеріалу в завантажувальній зоні корпусу екструдера для використовуваного матеріалу має підтримуватись менше 70 °С [33], при цьому під час розрахунку стінка циліндра завантажувальної секції екструдера розглядається як багатощарова циліндрична стінка [26, 27].



1 – корпус; 2 – гільза; 3 – кільцевий проміжок, заповнений повітрям або термопастою

Рис. 3 – Поперечний переріз корпуса

Як граничні умови, було задано конвективний теплообмін всередині робочої камери із температурою 70 °С і коефіцієнтом тепловіддачі 100 Вт/(м²·К), а ззовні корпуса в зоні завантажувальної лійки – температурою 22 °С і коефіцієнтом тепловіддачі 10 Вт/(м²·К) (рис. 4).

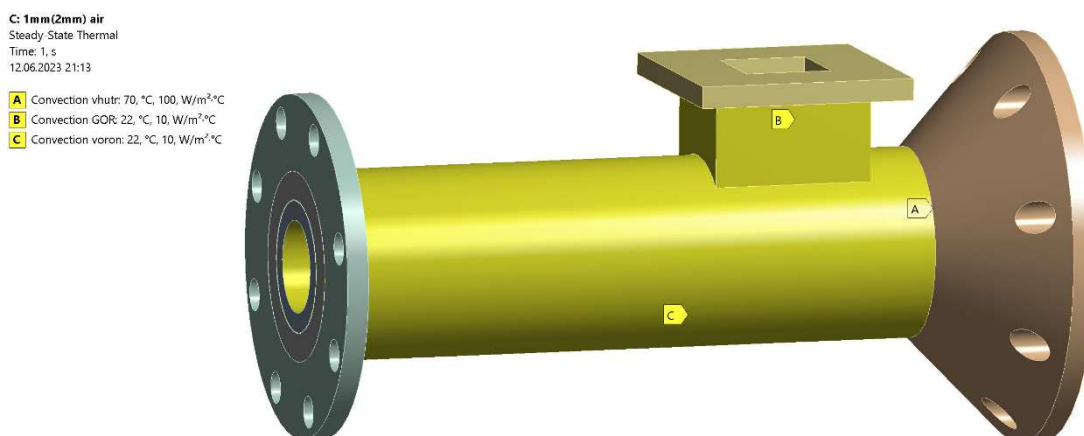
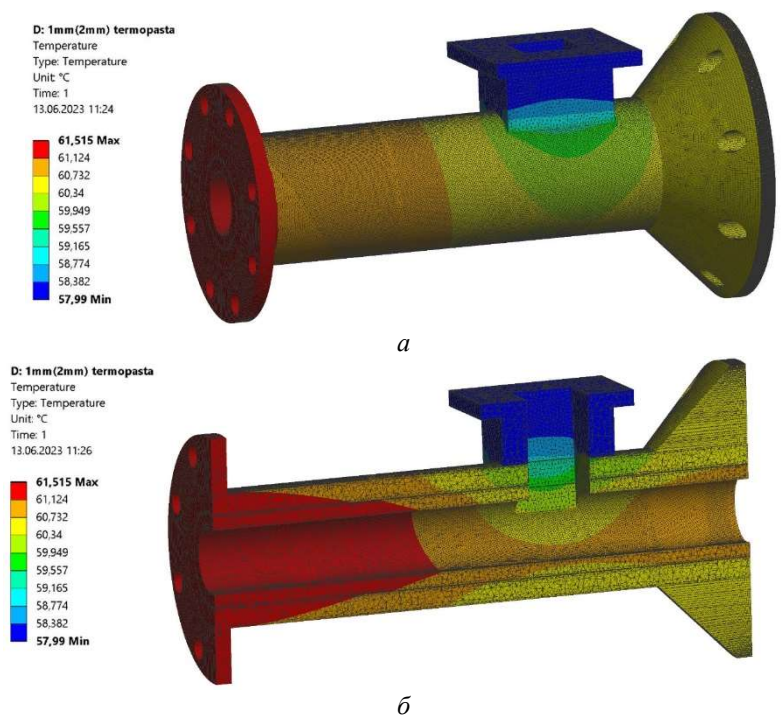


Рис. 4 – Візуалізація заданих граничних умов

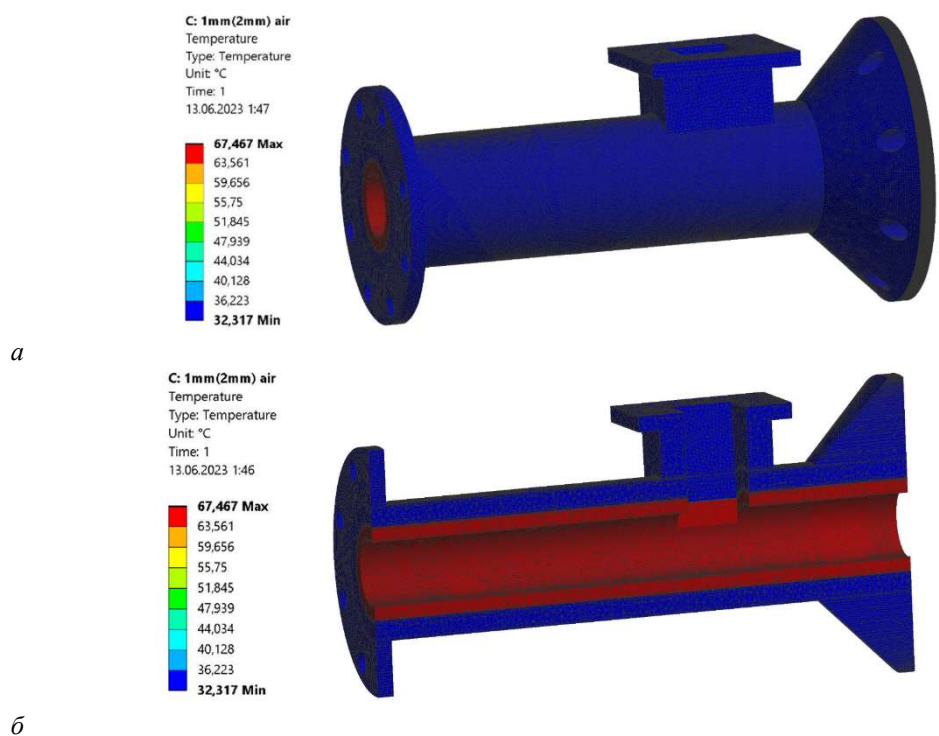
Результати досліджень. На рис. 5 наведено отриманий розподіл температур в конструкції корпуса екструдера в разі заповнення кільцевого проміжку термопастою (у разі використання теплопровідної вставки з термопасти), а на рис. 6 – у разі заповнення кільцевого проміжку повітрям.

Обговорення результатів. З отриманих результатів видно, що за традиційного способу складання корпуса екструдера [5, 25], коли між корпусом і змінною циліндричною гільзою залишається повітря, температура на стінці робочого каналу (на внутрішній поверхні гільзи) досягає 67,5 °С, а за умови використання термопасти для заповнення проміжку, коли перед розміщенням змінної циліндричної гільзи в циліндричному каналі корпуса на одну з їхніх сполучних циліндричних поверхонь наносять термопасту, – 61,5 °С, тобто зазначена температура зменшується приблизно на 9 %. Також при цьому вирівнюється розподіл температури вздовж циліндра.

Додатково було проведено дослідження з використанням однієї із найкращих на ринку більш ефективної термопасти з теплопровідністю мінімум 8,4 Вт/(м·К) [34]. При цьому температура на внутрішній поверхні гільзи змінюється несуттєво (менше 1 °С), що доводить можливість використання більш дешевої термопасти під час складання конструкції корпуса.



a – загальний вигляд конструкції; *б* – повздовжній розріз конструкції
Рис. 5 – Розподіл температури в разі заповнення кільцевого проміжку циліндра термопастою



a – загальний вигляд конструкції; *б* – повздовжній розріз конструкції
Рис. 6 – Розподіл температури в разі заповнення кільцевого проміжку циліндра повітрям

Висновки. За рахунок заповнення кільцевого проміжку між внутрішньою поверхнею корпусу циліндра та зовнішньою поверхнею знімної гільзи забезпечується зниження термічного опору стінки складеного циліндра завантажувальної секції одночерв'ячного екструдера, а отже підвищується інтенсивність теплопередачі від перероблюваного матеріалу до охолоджувальної води крізь багат шарову стінку складеного циліндра та зменшується витрата охолоджувальної води, що підвищує енергоефективність одночерв'ячного екструдера в цілому.

Перспективи подальших досліджень. Надалі передбачено проаналізувати конструкції інших складових елементів конструкції черв'ячного екструдера і шляхи їх удосконалення для підвищення технологічних властивостей екструзійного обладнання.

Список використаної літератури

1. Витвицький В. М., Мікульонюк І. О. Моделювання процесу живлення черв'ячного екструдера полімерною сировиною. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 136 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/41177>
2. Мікульонюк І. О. Обладнання і процеси переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини. Київ : НТУУ «КПІ», 2009. 264 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/28259>
3. Мікульонюк І. О. Технологічні основи перероблення полімерів, пластмас і гумових сумішей. Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 312 с.
4. Мікульонюк І. О. Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 292 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/35084>
5. Schenkel G. *Plastics Extrusion Technology and Theory. The design and operation of screw extruders for plastics.* London : Iliffe Books Ltd., 1966. 477 p.
6. Ledningsbyggande med plaströrsystem / Ed. I. Björklund. Stockholm : Nordiska plaströrgruppen (NPG), 1999. 117 p. URL: https://www.pipelife.dk/content/dam/pipelife/sweden/marketing/general/installation-guidelines/infrastruktur/va/NPG_Ledningsbyggande%20med%20plastr%C3%B6rsystem_Mars_1999_1.pdf
7. Tadmor Z., Klein I. *Engineering principles of plasticating extrusion.* New York : Van Nostrand Reinhold, 1970. 479 p.
8. Tadmor Z., Gogos C. G. *Principles of polymer processing.* 2nd ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2006. 961 p. URL: <http://www3.fi.mdp.edu.ar/procesamiento1/material/Tadmor-Gogos.pdf>
9. Rauwendaal C. *Understanding extrusion.* Munich : Hanser Publishers, 2010. 231 p.
10. Вознюк В. Т., Мікульонюк І. О. Інтенсифікація процесу виготовлення екструдованих полімерних труб. Київ : НТУУ «КПІ», 2012. 144 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37521>
11. Rauwendaal C. *Polymer extrusion.* 5th ed. Munich : Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2014. 950 p. URL: <https://doi.org/10.3139/9781569905395>
12. Vlachopoulos J., Polychronopoulos N. D. *Understanding rheology and technology of polymer extrusion.* Dundas, ON, Canada : Polydynamics Inc., 2019. 337 p. URL: http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/Rheo_Tech_Book_Part_A.pdf
13. *Polymer Processing: Principles and Modeling.* 2nd ed. / J.-F. Agassant, P. Avenas, P. J. Carreau et al. Munich : Carl Hanser Verlag, 2017. 841 p.
14. Mikulyonok I. O. Equipment for preparing and continuous molding of thermoplastic composites // *Chemical and Petroleum Engineering.* 2013. Vol. 48, N 11–12. P. 658–661. DOI: 10.1007/s10556-013-9676-x
15. Mikulyonok I. O. Intensification of Fabrication of Extruded Polymeric Shapes // *Chemical and Petroleum Engineering.* 2014. Vol. 50, N 7–8. P. 483–488. DOI: 10.1007/s10556-014-9927-5
16. Сокольський О. Л., Мікульонюк І. О. Моделювання обладнання і процесів перероблення полімерних матеріалів методом екструзії. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 252 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37481>
17. Мікульонюк І. О., Радченко Л. Б. Полімерні композитні матеріали й вироби з них. Одержання, перероблення та властивості. Київ : ІВЦ «Видавництво «Політехніка»», 2005. 179 с.
18. Мікульонюк І. О., Сокольський О. Л. Полімерні матеріали і вироби з них (одержання, перероблення, властивості). Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 208 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37632>
19. Моделювання процесу неізотермічного живлення одночерв'ячного екструдера / О. С. Будзинська, В. В. Лукашова, І. О. Мікульонюк, Л. Б. Радченко // *Наукові праці ОНАХТ.* 2006. Вип. 28, т. 2. С. 190–192.
20. Mikulyonok I. O. Classification of Screw Cooling Devices of Single-Screw Extruders for Polymer Materials

- Processing (Survey of Designs) // Chemical and Petroleum Engineering. 2022. Vol. 58, N 1–2. P. 68–73. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-022-01057-5>
21. Мікульонок І. О., Гавва О. М., Кривопляс-Володіна Л. О. Інноваційне обладнання для приготування та перероблення полімерних матеріалів і гумових сумішей. Київ : НУХТ, 2022. 139 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/57427>
 22. Мікульонок І. О., Радченко Л. Б. Переробка вторинної сировини екструзією. Київ : НТУУ «КПІ», 2006. 184 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38062>
 23. Лукашова В. В., Мікульонок І. О., Радченко Л. Б. Екструзія пінополімерів. Київ : НТУУ «КПІ», 2011. 176 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37522>
 24. Mikulionok I. O. Screw extruder mixing and dispersing units // Chemical and Petroleum Engineering. 2013. Vol. 49, N 1–2. P. 103–109. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-013-9711-y>
 25. Рябинин Д. Д., Лукач Ю. Е. Червячные машины для переработки пластических масс и резиновых смесей. Москва : Машиностроение, 1965. 363 с.
 26. Мікульонок І. О. Проектування теплової ізоляції обладнання і трубопроводів. Київ : НТУУ «КПІ», 2013. 188 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37583>
 27. Процеси та обладнання хімічної технології / Я. М. Корнієнко, Ю. Ю. Лукач, І. О. Мікульонок та ін. Київ : НТУУ «КПІ», 2011. – [Ч. 1. – 300 с.; Ч. 2. – 416 с.].
 28. Спосіб складання завантажувальної секції циліндра одночерв'ячного екструдера : пат. 153651U Україна / І. О. Мікульонок, В. М. Витвицький, Витвицький Влад. М., О. Л. Сокольський, Т. Б. Шилович ; № u202301131 ; заявл. 20.03.2023 ; опуб. 02.08.2023, Бюл. № 31. 4 с.
 29. Термопаста TS-4 - Радиомат РСК компоненти. URL: https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/termopasta-ts-4-4-vt-m-k-7g-2ml_122551.html (дата звернення: 05.06.23)
 30. Ansys : Engineering Simulation Software. URL: <https://www.ansys.com/> (дата звернення: 05.06.23)
 31. SorVyl G 2171 / 9005 11/01 1. Identification of the substan – plasticker. URL: http://plasticker.de/recybase/docs/28551_1452502854.pdf (дата звернення: 05.06.23)
 32. Доброногов В. Г., Мікульонок І. О. Застосування корозійностійких, жаростійких, жароміцних сталей і сплавів у хімічному машино- та апаратобудуванні. Київ : НТУУ «КПІ», 2011. 264 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37716>
 33. Основи проектування одночерв'ячних екструдерів / І. О. Мікульонок, О. Л. Сокольський, В. І. Сівецький, Л. Б. Радченко. Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 200 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/25367>
 34. MX-4. Premium Performance Thermal Paste. ARCTIC. URL: <https://www.arctic.de/en/MX-4/ACTCP00002B> (дата звернення: 05.06.23)
-

Vyktor Vytvytskyi, Vladyslav Vytvytskyi, Ihor Mikulionok, Oleksandr Sokolskyi, Tetiana Shylovych

STUDY OF THE MODERNIZED SINGLE-SCREW EXTRUDER BODY ENERGY EFFICIENCY

The subject of the study is the energy efficiency of the polymer extrusion process in a single-screw extruder for the polymer materials processing.

The purpose of the research is to improve the design of the feeding section of the single-screw extruder cylinder, which consists in placing thermal paste in the gap between the connecting cylindrical surfaces of the removable cylindrical sleeve and the channel of the feeding section cylinder, which reduces the thermal resistance of the section wall and improves heat transfer from the processed material to the cooling water, and therefore, it makes it possible to reduce its consumption.

To check the energy efficiency of the proposed technical solution, thermal calculation of the basic and modernized structures of the feeding section cylinder was performed in the Steady Thermal model of the Ansys program. Polyvinyl chloride brand SorVyl G 2171/9005 11/01 was chosen as a recyclable polymer, alloy steel as the material of the feeding section elements, and thermal paste with a thermal conductivity of 4 W/(m·K) as a filler for the annular space between the cylinder and the sleeve.

The analysis of the calculations showed that the use of thermal paste instead of air in the gap between the cylinder and the removable cylindrical sleeve reduces the thermal resistance of the cylinder wall by 9 %, while with the traditional method of assembling the extruder body, the temperature on the inner surface of the sleeve was 67.5 °C,

and under the condition application of thermal paste – 61.5 °C. At the same time, the temperature field along the length of the feeding section of the cylinder is also equalized. In addition, it is worth noting that the type of thermal paste used has almost no effect on the thermal resistance of the section wall, so in the proposed design it is possible to use low-cost thermal paste (replacing the thermal paste with a thermal conductivity of 4 W/(m·K) with a more effective one with a thermal conductivity of 8.4 W/(m·K) reduced the temperature on the inner surface of the sleeve by only 1 K).

The proposed improvement of the feeding section of the cylinder of a single-screw extruder can be applied not only in the polymer processing industry, but also in the food and processing industries in the construction of screw machines for various purposes.

Reducing the thermal resistance of the cylinder section wall of the single-screw extruder ensures a reduction in the flow of cooling water circulating in the cylinder channel and equalizes the temperature field along the length of the feeding section of the cylinder, and therefore prevents premature melting of the polymer and ensures reliable generation of pressure in the working channel of the extruder.

Keywords: screw extruder, feeding section, thermal resistance, modernization, energy efficiency.

References

1. Vytvytskyi, V. M., Mikulionok, I. O. (2021). Modeliuvannia protsesu zhivlennia cherviachnogo ekstrudera polimernoiu syrovynoiu [Modeling the process of feeding a screw extruder with polymer raw materials]. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/41177> (Ukr.)
2. Mikulionok, I. O. (2009). Obladnannia i protzesy pererobky termoplastychnykh materialiv z vykorystanniam vtorynnoi syrovyny [Equipment and Processes for Treating Thermoplastic Materials with Use of Secondary Raw Materials]. NTUU "KPI", Kyiv. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/28259> (Ukr.)
3. Mikulionok, I. O. (2015). Technologichni osnovy pereroblennia polimeriv, plastmas i gumovykh sumishei [Technological bases of polymers, plastics and rubber mixtures processing]. NTUU "KPI", Kyiv. (Ukr.)
4. Mikulionok, I. O. (2020). Technologichni osnovy pereroblennia polimernykh materialiv [Technological bases of polymer materials processing]. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/35084> (Ukr.)
5. Schenkel, G. (1966). Plastics Extrusion Technology and Theory. The design and operation of screw extruders for plastics. Iliffe Books Ltd., London.
6. Ledningsbyggande med plaströsystem / Ed. I. Björklund. Stockholm : Nordiska plaströrgruppen (NPG) (1999). URL: https://www.pipelife.dk/content/dam/pipelife/sweden/marketing/general/installation-guidelines/infrastruktur/va/NPG_Ledningsbyggande%20med%20plastr%C3%B6system_Mars_1999_1.pdf
7. Tadmor Z., Klein I. Engineering principles of plasticating extrusion. New York : Van Nostrand Reinhold, 1970. 479 p.
8. Tadmor, Z., Gogos, C. G. (2006). Principles of polymer processing. 2nd ed. John Wiley & Sons, Hoboken. URL: <http://www3.fi.mdp.edu.ar/procesamiento1/material/Tadmor-Gogos.pdf>
9. Rauwendaal, C. (2010). Understanding extrusion. Hanser Publishers, Munich.
10. Vozniuk, V. T., Mikulionok, I. O. (2012). Intensyfikatsiia procesu vygotovlennia ekstrudovanykh polimernykh trub [Intensification of the manufacturing extruded polymer pipes process]. NTUU "KPI", Kyiv. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37521> (Ukr.)
11. Rauwendaal, C. (2014). Polymer extrusion. 5th ed. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, Munich. URL: <https://doi.org/10.3139/9781569905395>
12. Vlachopoulos, J., Polychronopoulos, N. D. (2019). Understanding rheology and technology of polymer extrusion. Polydynamics Inc., Dundas, ON, Canada. URL: http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/Rheo_Tech_Book_Part_A.pdf
13. Agassant, J.-F., Avenas, P., Carreau, P. J., Vergnes, B., Vincent, M. (2017). Polymer Processing: Principles and Modeling. 2nd ed. Carl Hanser Verlag, Munich.
14. Mikulyonok, I. O. (2013). Equipment for preparing and continuous molding of thermoplastic composites. *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 48, no 11–12, pp. 658–661. doi: 10.1007/s10556-013-9676-x
15. Mikulenok, I. O. (2014). Intensification of Fabrication of Extruded Polymeric Shapes. *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 50, no 7–8, pp. 483–488. doi: 10.1007/s10556-014-9927-5
16. Sokolskyi, O. L., Mikulionok, I. O. (2020). Modeliuvannia obladdnannia i protsesiv pereroblennia polimernykh materialiv metodon ekstruzii [Modeling of equipment and processing processes of polymer materials by the

- extrusion method]. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37481> (Ukr.)
17. Mikulionok, I. O., Radchenko, L. B. (2005). Polimerni kompozytni materialy y vyroby z nykh. Oderzhannia, pereroblennia ta vlastyvoli [Polymer composite materials and products from them. Production, processing and properties]. IVTs «Vydavnytstvo "Politekhnikha"», Kyiv. (Ukr.)
 18. Mikulionok, I. O., Sokolskyi, O. L. (2015). Polimerni materialy i vyroby z nykh (oderzhannia, pereroblennia, vlastyvoli) [Polymer materials and products from them (production, processing, properties)]. NTUU "KPI", Kyiv. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37632> (Ukr.)
 19. Budzynska, O. S., Lukashova, V. V., Mikulionok, I. O., Radchenko, L. B. (2006). Modeliuvannia protsesiv neizotermichnogo zhivlennia odnochervizchnogo ekstrudera [Modeling of the process of non-isothermal feeding of a single-screw extruder]. *Naukovi pratsi ONAKhT*, issue 28, vol. 2, pp. 190–192. (Ukr.)
 20. Mikulionok, I. O. (2022). Classification of Screw Cooling Devices of Single-Screw Extruders for Polymer Materials Processing (Survey of Designs). *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 58, no 1–2, pp. 68–73. doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-022-01057-5>
 21. Mikulionok, I. O., Gavva, O. M., Kryvoplias-Volodina, L. O. (2022). Innovatsiine obladnannia dlia prygotuvannia ta pereroblennia polimernykh materialiv i gumovykh sumishei [Innovative equipment for the preparation and processing of polymer materials and rubber mixtures]. NUKhT, Kyiv. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/57427> (Ukr.)
 22. Mikulionok, I. O., Radchenko, L. B. (2006). Pererobka vtorynnoi syrovyny ekstruziieiu [Processing of secondary raw materials by extrusion]. NTUU "KPI", Kyiv. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38062> (Ukr.)
 23. Lukashova, V. V., Mikulionok, I. O., Radchenko, L. B. (2011). Ekstruziia pinopolimeriv [Extrusion of foam polymers]. NTUU "KPI", Kyiv. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37522> (Ukr.)
 24. Mikulionok, I. O. (2013). Screw extruder mixing and dispersing units. *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 49, no 1–2, pp. 103–109. doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-013-9711-y>
 25. Riabinin, D. D., Lukach, Yu. Ye. (1965). Chervjachnye mashyny dlja pererabotky plastycheskykh mass y rezynovykh smesej [Screw machines for processing plastics and rubber compounds]. Mashinostroyeniye, Moscow. (Rus.)
 26. Mikulionok, I. O. (2013). Proektuvannia teplovoi izoliatsii obladnannia i truboprovodiv [Design of thermal insulation of equipment and pipelines]. NTUU "KPI", Kyiv. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37583> (Ukr.)
 27. Korniyenko, Ya. M., Lukach, Yu. Yu., Mikulionok, I. O., Rakytskyi, V. L., Riabtsev, G. L. (2011). Protsesy ta obladnannia khimichnoi tekhnologii [Processes and equipment of chemical technology]. NTUU "KPI", Kyiv. [Part 1. – 300 p.; Part 2. – 416 p.]. (Ukr.)
 28. Sposib skladannia zavantazhuvalnoi sektsii tzylyndra odnocherviachnogo ekstrudera [The method of assembling the loading section of the cylinder of a single-screw extruder]: Pat. 153651U Ukraine / I. O. Mikulionok, V. M. Vytvytskyi, Vlad. M. Vytvytskyi, O. L. Sokolskyi, T. B. Shilovych ; N u202301131 ; Filed 20.03.2023 ; Publ. 02.08.2023, bulletin N 31. 4 p. (Ukr.)
 29. Termopasta TS-4 - Radiomag RSK kompomemty [25. Thermal paste TS-4 - Radiomag RSK components]. URL: https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/termopasta-ts-4-4-vt-m-k-7g-2ml_122551.html (Accessed June 05, 2023) (Ukr.)
 30. Ansys : Engineering Simulation Software. URL: <https://www.ansys.com/> (Accessed June 05, 2023)
 31. SorVyl G 2171 / 9005 11/01 1. Identification of the substan – plasticker. URL: http://plasticker.de/recybase/docs/28551_1452502854.pdf (Accessed June 05, 2023)
 32. Доброгов Б. Г., Mikulionok, I. O. (2011). Zastusuvannia koroziiostiikykh, zharostiikykh, zharomirznykh staley i splaviv u khimichnomu mashino- ta aparatobuduvanni [Application of corrosion-resistant and heat-resistant steels and alloys in chemical engineering]. NTUU "KPI", Kyiv. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37716> (Ukr.)
 33. Mikulionok, I. O., Sokolskyi, O. L., Sivetzkyi, V. I., Radchenko, L. B. (2015). Osnivy proektuvannia odnocherviachnykh ekstruderiv [Fundamentals of designing single-screw extruders]. NTUU "KPI", Kyiv. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/25367> (Ukr.)
 34. MX-4. Premium Performance Thermal Paste. ARCTIC. URL: <https://www.arctic.de/en/MX-4/ACTCP00002B> (Accessed June 05, 2023).
-