

Єгор Трачук¹, Микола Швед², Дмитро Швед³

¹студент-магістрант кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: yehor.trachuk@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1802-2058>

²кандидат технічних наук, доцент кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: npchved46@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7725-1447>

³кандидат технічних наук, провід. інженер кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: npchved46@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6860-3017>

ОПТИМІЗАЦІЯ КАСКАДНОЇ СХЕМИ ВИСОКОШВИДКІСНОЇ ЕКСТРУЗІЇ

Розробка та впровадження ресурсо- та енергоефективних технологій у сфері переробки пластмас є необхідною умовою для сталого розвитку людства. Стаття є оглядовою та присвячена оптимізації процесів, що відбуваються при екструзії композиційних матеріалів на базі полімерів. Проаналізовано сучасні пропозиції на ринку екструзійного обладнання та запропоновано використовувати більш енергоефективну, порівняно з представленими, каскадну дискову-шестеренну схему екструзії, яка має зворотний зв'язок з приводом дозатора, що дає змогу в автоматичному режимі узгоджувати продуктивність дозатора та шестеренного насоса. Запропонована схема є енергоефективною та дозволяє виготовляти погонажні вироби з мінімальними допусками на розміри.

Ключові слова: ресурсоенергозбереження; високошвидкісна екструзія; каскадна схема екструзії; дисковий екструдер; шестеренний насос.

Табл.: 2. Рис.: 3. Бібл.: 12.

Актуальність теми дослідження. Пластмаси є одним із найбільш поширених матеріалів. Завдяки своїм високим техніко-економічним показникам цей клас матеріалів використовується майже у всіх галузях промисловості та побуту, саме тому, станом на 2020 рік світовий обсяг виробництва пластмасових виробів становив 367 млн тонн [1]. Аналіз сучасних тенденцій та перспектив розвитку цієї галузі пророкує що станом на 2030 рік ринок полімерних матеріалів буде становити 1078,5 млрд дол., при показнику 713 млрд дол. на 2021 рік [2].

Водночас актуальність проблеми переробки пластмас підтверджується дуже високим рівнем уваги до цього сектору економіки з боку природоохоронних організацій, оскільки пластмасові вироби безпосередньо впливають на цілі сталого розвитку під номерами 8, 9, 11-14 [3].

Зважаючи на вищезазначене, створення нового та оптимізація наявного обладнання для переробки полімерів із використанням економічно обґрунтованих, високопродуктивних, ресурсоенергоощадних процесів є необхідними для забезпечення сталого розвитку суспільства.

Постановка проблеми. Нині найбільш актуальною проблемою в галузі переробки полімерів методом екструзії є забезпечення якомога кращих показників ресурсоенергоефективності обладнання. При цьому дуже активно розвивається напрямок створення композицій на основі полімерів, що потребує від екструзійних ліній більшої гнучкості в керуванні, оскільки на основі одного полімеру може бути розроблена велика кількість композицій, що відрізняються за своїми характеристиками [4].

Найпоширеніші на цей момент одночерв'ячні екструдери в змозі ефективно переробляти лише той матеріал, для якого вони були спроектовані. Переробка матеріалів, що відрізняються за характеристиками, є ускладненою або взагалі не може бути реалізована на таких машинах, оскільки всі операції, з яких складається процес екструзії, жорстко пов'язані між собою і виконуються одним робочим органом. Існуюча фізична модель процесів, які відбуваються в черв'ячних екструдерах, являє собою структуру з підмоделями зон дозування, плавлення та гомогенізації. Такий поділ є приблизним, оскільки він не враховує складний характер взаємодії між зонами та процесами, що в них відбуваються [5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Перелічені вище обставини призвели до того, що на сьогодні у промисловості дедалі більшого поширення набувають екструзійні лінії, виконані за каскадним принципом. Найбільшого поширення набули каскадні машини, що складаються з двох екструдерів. В одних випадках перший екструдер призначений для підготовки якісного розплаву, а другий – для його дозування. Іншим варіантом є схема, при якій перший екструдер готує агломерат, а другий – призначений для кінцевого доведення розплаву та дозування його до формуючого елемента [6].

Аналіз ринку екструзійного обладнання [7; 8] показав, що більшим попитом користуються схеми першого типу, де на першій стадії встановлюється високошвидкісний двочерв'ячний екструдер, частота обертання органів якого може сягати 600 об/хв, а на другій – одночерв'ячний, що працює при нормальних, або понижених обертах (65-85 об/хв). Порівняльна характеристика сучасних екструзійних машин наведена в таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика сучасних ліній каскадної екструзії

Виробник	Модель	Тип екструдера	Частота обертання	Потужність	Сумарна потужність	Продуктивність	Питома витрата енергії
			об/хв	кВт	кВт	кг/год	кВт · год/кг
Nanjing Haisi Extrusion Equipment Co.	SP50-120	Двочерв'ячний	500	45	82	300	0,273
		Одночерв'ячний	85	37			
	SP65-150	Двочерв'ячний	500	75	120	500	0,240
		Одночерв'ячний	85	45			
	SP75-180	Двочерв'ячний	500	110	165	600	0,275
		Одночерв'ячний	85	55			
Nanjing Yongteng Chemical Equipment Co	SHJS50-120	Двочерв'ячний	500	45	82	300	0,273
		Одночерв'ячний	85	37			
	SHJS65-150	Двочерв'ячний	500	75	120	500	0,240
		Одночерв'ячний	85	45			
	SHJS75-180	Двочерв'ячний	500	110	165	600	0,275
		Одночерв'ячний	85	55			

При виготовленні композиційних термопластичних матеріалів етап гомогенізації є визначальним, оскільки саме від якості перемішування компонентів між собою залежать характеристики отриманого виробу. Саме тому наведені вище виробники застосовують високошвидкісні двочерв'ячні екструдери, у яких у матеріалі розвиваються великі швидкості зсуву, що забезпечують необхідний рівень нагрівання та гомогенізації розплаву.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Якісний, з можливістю регулювання гомогенного складу, розплав полімеру можна підготувати, використовуючи набагато простіший за конструкцією каскадний дисково-черв'ячний екструдер (рис. 1) [9], де як розплавлювач-гомогенізатор використовують дисковий екструдер із дозованим живленням, що працює в автогенному режимі, а для створення тиску та дозування – одночерв'ячний екструдер завдовжки 5-7 діаметрів. Теоретичні й експериментальні дослідження з удосконалення процесів екструзії, які проводяться на кафедрі МАХНВ КПІ ім. Ігоря Сікорського, показали, що процеси плавлення ефективніше проводити в полі високих швидкостей зсуву при незначних тисках, тобто реалізуючи модель дисперсійного плавлення, яка у 4-5 разів ефективніша за класичну пробкову модель плавлення Тадмора й полягає в тому, що частинки твердого полімеру дисперговані в його розплаві [10].

Реалізувати таку модель можливо в дисковому екструдері, що працює при дозованому живленні. Це дозволяє оперативно, без зупинки процесу, не змінюючи продуктивність підвищувати або знижувати температуру розплаву, регулюючи термомеханічне навантаження на перероблюваний матеріал, що рівносильно для звичайного черв'ячного екструдера установам новий черв'як. Причому, якщо технологічно необхідно змі-

нити температуру чи швидкість зсуву в зонах сухого тертя і напіврозплаву, тобто на периферії диска, то доцільно використовувати можливість зміни частоти обертання дискового екструдера в межах $\pm 20\%$ від номінального значення. А якщо необхідно змінити навантаження на розплав, наприклад з метою покращення гомогенізації і диспергування, то ефективніше змінювати величину робочих зазорів у тих самих межах.

Параметри процесів у такому екструдері узгоджують не лише вибором геометричних розмірів робочих органів машини, а й роздільним підбором робочої швидкості дискового екструдера й величини робочих зазорів дискової зони при незмінній продуктивності дозатора.

Перероблюваний матеріал шнеком 1 з бункера дозується в завантажувальну горловину дискового екструдера 2, де захоплюється багатоканальною гвинтовою нарізкою диска. Під дією значних зусиль зсуву матеріал розігрівається, плавиться, змішується в робочих дискових зазорах А та подається для подальшої обробки до черв'ячного екструдера 3. Особливістю такого екструдера є те, що кожен з пристроїв оснащений своїм приводом з можливістю безступінчастого регулювання кутової швидкості обертання робочих органів. Між дисковим екструдером та черв'ячним насосом встановлено компенсатор 10, який має зворотний зв'язок із приводом дозатора та узгоджує продуктивність дозатора і дозуючого черв'ячного насоса.

Представлена схема організації процесу екструзії дозволяє дуже гнучко регулювати як температуру, так і гомогенність розплаву за допомогою можливості зміни частоти обертання дискового екструдера й величини дискового зазору при постійній продуктивності.

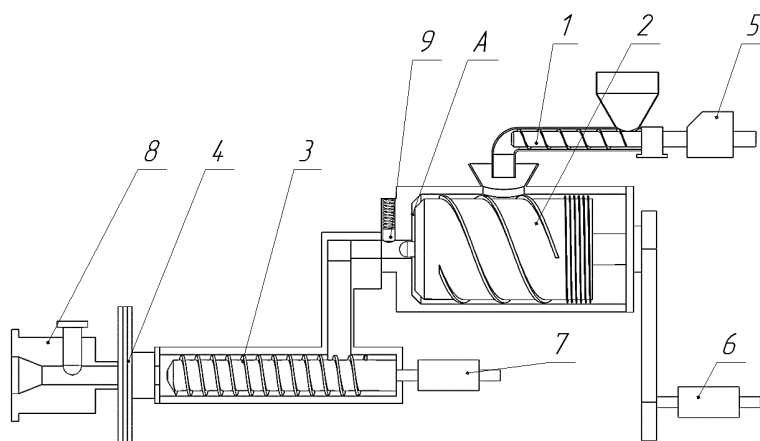


Рис. 1. Схема каскадного дисково-черв'ячного екструдера:

- 1 – шнековий дозатор; 2 – дисковий екструдер; 3 – черв'ячний екструдер; 4 – фільтр;
5, 6, 7 – приводи обертових органів каскадного екструдера;
8 – технологічна головка; 9 – компенсатор.

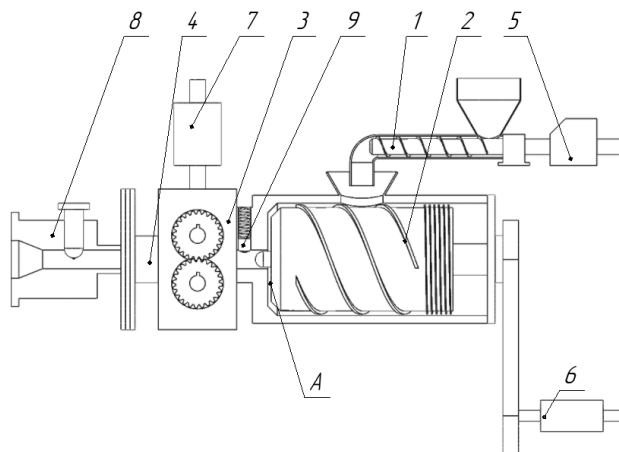
Джерело: [9].

При всіх перелічених перевагах наведена схема має один суттєвий недолік. При виготовленні погонажних виробів, таких як труби, кабелі, плівки тощо, дуже важливу роль відіграють коливання тиску та продуктивності на виході з черв'ячного екструдера. Саме від них залежать показники ефективності використання ресурсів, оскільки збільшені коливання призводять до збільшення допусків на геометричні розміри виробів і відповідно до перевитрати сировини. Для одношнекового екструдера, де дозування розплаву відбувається фактично в'язкісним черв'ячним насосом, енергоефективність якого не перевищує 10 % найкращим показником є коливання продуктивності на рівні 5-8 % [11-12] (рис. 3, а).

Метою статті є визначення можливості та доцільності більш ефективної організації каскадної схеми переробки композиційних матеріалів із використанням дискового екструдера.

Доцільність досліджень за цією тематикою пояснюється тим, що частка композиційних матеріалів у виробництві постійно збільшується і промисловість потребує якомога більш ресурсо- та енергоощадного обладнання для їх ефективної переробки.

Виклад основного матеріалу. Силами кафедри МАХНВ КПІ імені Ігоря Сікорського наведену вище дисково-черв'ячну каскадну установку було модернізовано встановленням як дозуючий пристрій шестеренного насоса (рис. 2), який, маючи значний внутрішній гідравлічний опір, дозволяє згладити пульсації тиску та продуктивності, що викликані різними чинниками в попередніх процесах, і забезпечити більш точне дозування розплаву.



*Рис. 2. Схема каскадного дисково-шестеренного екструдера:
1 – шнековий дозатор; 2 – дисковий екструдер; 3 – шестеренний насос; 4 – фільтр;
5, 6, 7 – приводи обертових органів каскадного екструдера;
8 – технологічна головка; 9 – компенсатор*

Джерело: [11].

У результаті проведених експериментальних досліджень при виробництві поліпропіленових труб діаметром 32 мм і запланованою середньою товщиною стінки труби $3,6^{+0,6}$ мм було визначено, що середня товщина стінки зменшилась з 3,9 до 3,65 мм, що дозволило виготовляти трубу з меншими допусками на геометричні розміри та, відповідно, заощаджувати до 5,5 % сировини (рис. 3).

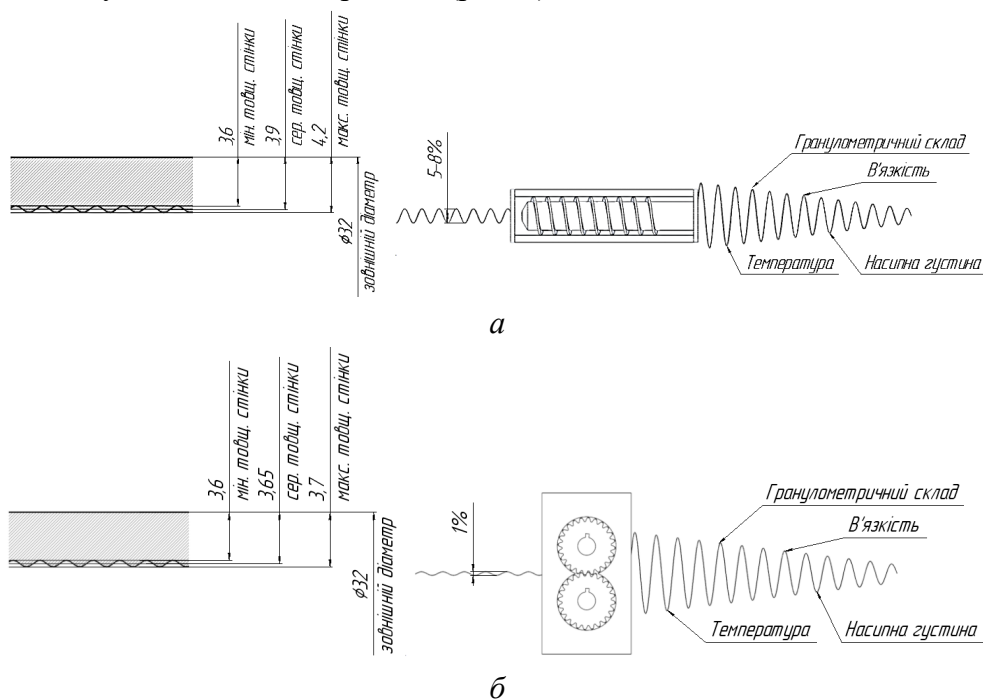


Рис. 3. Коливання середньої товщини стінки труби діаметром 32×3,6 залежно від дозуючого пристрою:

а – черв'ячний екструдер; б – шестеренний насос

Джерело: розроблено авторами.

Отримані технічні параметри дисково-шестеренного екструдера (табл. 2), показують, що запропонована каскадна схема екструзії є більш енергоефективною за наведені насьогодні пропозиції на ринку, оскільки питома витрата енергії на кілограм готової продукції є мінімум на 17,7 % нижчою, ніж у конкурентів (0,1975 кВт год/кг проти 0,24 кВт год/кг).

Таблиця 2 – Технічна характеристика каскадного дисково-шестеренного екструдера

Тип робочого елементу	Частота обертання	Потужність	Сумарна потужність	Продуктивність	Питома витрата енергії
	об/хв	кВт	кВт	кг/год	кВт/кг
Черв'ячний дозатор	30	0,2	7,9	40	0,1975
Дисковий екструдер	175	5,5			
Шестеренний насос	65	2,2			

Висновки. Аналіз літературних матеріалів, а також проведені попередні експериментальні роботи на дослідній установці показали, що використання каскадних дисково-шестеренних екструдерів дозволяє більш ефективно використовувати енергію та ресурси, а також дає можливість:

- гнучко керувати процесом екструзії з можливістю незалежно оптимізувати окремі процеси;
- забезпечувати високу якість гомогенізації розплаву незалежно від продуктивності лінії;
- збільшити номенклатуру матеріалів, що перероблюються;
- забезпечити стабілізацію коливання тиску та продуктивності на рівні ± 1 %;
- заощаджувати до 6,4 % сировини і енергії, яка б пішла на її перероблення;
- здійснювати просту дегазацію розплаву через завантажувальну горловину дискового екструдера;
- за рахунок наявності кількох приводів раціонально перерозподіляти потужність між каскадами й тим самим покращувати питомі енергопоказники;
- ефективно використовувати енергію дисипації в дисковому екструдері;
- використовувати конструктивно простіші робочі органи.

Список використаних джерел

1. Plastics – the Facts 2021. Plastics Europe Enabling a sustainable future [Electronic resource]. – Access mode: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2021>.
2. Polymers Market Size to Worth Around USD 1078.5 Billion by 2030 [Electronic resource] / GlobeNewswire. – Access mode: <https://www.globenewswire.com/en/news-release/2022/10/26/2542304/0/en/Polymers-Market-Size-to-Worth-Around-USD-1078-5-Billion-by-2030.html>.
3. Цілі сталого розвитку [Електронний ресурс] / Global Compact network Ukraine. – Режим доступу: <https://globalcompact.org.ua/pro-nas/tsili-stijkogo-rozvytku>.
4. Мікульонок І. О. Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів : навч. посіб. / І. О. Мікульонок. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 293 с.
5. Радченко Л. Б. Переробка термопластів методом екструзії / Л. Б. Радченко. – Київ : ІЗМН, 1999. – 220 с.
6. Ковба А. М. Розроблення екструдера для модернізації установки виробництва полімерних гранул [Електронний ресурс] / А. М. Ковба. – Київ, 2019. – 137 с. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/31552>.
7. Soft/Rigid PVC Compounding Granules Making Machine [Electronic resource] / Nanjing Haisi Extrusion Equipment Co. – Access mode: <https://www.haisiextrusion.com/Soft-Rigid-PVC-Compounding-Granules-Making-Machine-pd6327554.html>.
8. SHJS 75/180 Two-stage Compounding Extrusion Line [Electronic resource] / Nanjing Yongteng Chemical Equipment Co. – Access mode: <http://yongtenggroup.com/content/?141.html#:~:text=Nanjing%20Yongteng%20Chemical%20Equipment%20Co.%2C%20Ltd.>

9. Швед Н. П. Разработка процессов экструзии термопластов на каскадных экструдерах : дис. ... канд. техн. наук / Н. П. Швед. – Киев, 1983. – 167с.

10. Переваги використання каскадних схем та дозуючих шестеренних насосів при екструзії полімерів / І. В. Луценко, Д. М. Швед, М. П. Швед, А. С. Богатир // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2013. – № 1/2(9). – С. 21-25.

11. Rauwendaal C. Polymer extrusion / C. Rauwendaal. – München : Carl Hanser Verlag, 2014. – 950 с.

12. Швед Д. М. Процес екструзії полімерів на каскадному дисково-шестеренному екструдері [Електронний ресурс] : дис. ... канд. техн. наук / Д. М. Швед. – Київ, 2017. – Режим доступу: https://ela.kpi.ua/jspui/bitstream/123456789/19317/1/Shved_diss.pdf.

References

1. *Plastics – the Facts 2021*. Plastics Europe Enabling a sustainable future. (2021). <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2021>.

2. *Polymers Market Size to Worth Around USD 1078.5 Billion by 2030*. (2022, 26 October). GlobeNewswire. <https://www.globenewswire.com/en/news-release/2022/10/26/2542304/0/en/Polymers-Market-Size-to-Worth-Around-USD-1078-5-Billion-by-2030.html>.

3. Global Compact network Ukraine. (n.d.). *Tsili staloho rozvytku [Sustainable development goals]*. <https://globalcompact.org.ua/pro-nas/tsili-stijkogo-rozvytku>.

4. Mikulonok, I.O. (2020). *Tekhnolohichni osnovy pereroblennia polimernykh materialiv [Technological basis of polymer materials processing]*. KPI im. Ihoria Sikorskoho.

5. Radchenko, L.B. (1999). *Pererobka termoplastiv metodom ekstruzii [Processing of thermoplastics by extrusion]*. IZMN.

6. Kovba, A.M. (2019) *Rozroblennia ekstrudera dlia modernizatsii ustanovky vyrobnytstva polimernykh hranul [Extruder development to upgrade polymer pellet plant]* [Master's Thesis; Kyivskiy politekhnichnyi instytut imeni Ihoria Sikorskoho]. ELAKPI. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/31552>.

7. Soft/Rigid PVC Compounding Granules Making Machine. Nanjing Haisi Extrusion Equipment Co. (n.d.). <https://www.haisiextrusion.com/Soft-Rigid-PVC-Compounding-Granules-Making-Machine-pd6327554.html>.

8. SHJS 75/180 Two-stage Compounding Extrusion Line (b. d.). Nanjing Yongteng Chemical Equipment Co. (n.d.). <http://yongtenggroup.com/content/?141.html#:~:text=Nanjing%20Yongteng%20Chemical%20Equipment%20Co.%2C%20Ltd>.

9. Shved, N.P. (1983). *Razrabotka protsessov ekstruzyy termoplastov na kaskadnykh ekstruderakh [Development of thermoplastic extrusion processes on cascade extruders]*. [PhD Dissertation; Kyivskiy politekhnichnyi instytut imeni Ihoria Sikorskoho].

10. Lutsenko, I.V., Shved, D.M., Shved, M.P., & Bohatyr, (2013). *Perevahy vykorystannia kaskadnykh skhem ta dozuiuchykh shesterennykh nasosiv pry ekstruzii polimeriv [Advantages of using cascade circuits and metering gear pumps in polymer extrusion]*. *Tekhnolohichni audyt ta rezervy vyrobnytstva – Technological audit and production reserves*, (1/2(9)), 21–25.

11. Rauwendaal, C. (2014). *Polymer extrusion*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.

12. Shved, D.M. (2017). *Protses ekstruzii polimeriv na kaskadnomu dyskovo-shesterennomu ekstruderі [Polymer extrusion process on a cascade disc gear extruder]* [PhD Dissertation; Kyivskiy politekhnichnyi instytut imeni Ihoria Sikorskoho]. ELAKPI. https://ela.kpi.ua/jspui/bitstream/123456789/19317/1/Shved_diss.pdf.

Отримано 27.03.23

Yehor Trachuk¹, Mykola Shved², Dmytro Shved³

¹PhD Student of the Department of Machines and Apparatus of Chemical and Oil Refining Industries
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: yehor.trachuk@gmail.com **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0006-1802-2058>

²PhD in Technical Sciences,

Associate Professor of the Department of Machines and Apparatus of Chemical and Oil Refining Industries
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: npchved46@gmail.com **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7725-1447>

³PhD in Technical Sciences, Engineer of the Department of Machines and Apparatus of Chemical and Oil Refining Industries
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: npchved46@gmail.com **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6860-3017>

OPTIMIZATION OF CASCADE SCHEME OF HIGH-SPEED EXTRUSION

Plastics are one of the most common materials. Due to its high technical and economical characteristics, this class of materials is used in almost all industries, that is why further growth of the production of plastic products is predicted. Today, the biggest problem in the field of polymer processing by extrusion is to ensure the best possible parameters of resource-energy efficiency of equipment. At the same time, the creating of compounds based on polymers is developing very actively, which requires more flexibility from extrusion lines, since a large number of compositions which differ in their characteristics can be developed on the base of a polymer. The factors listed above have led to cascade extrusion lines become increasingly widespread in industry today. Analysis of the extrusion equipment market showed that the schemes with a high-speed double-string extruder at the first stage is more popular. However, the desired mixing quality can be achieved by using a much simpler disc extruder. The article is a review that aims to determine the possibility and feasibility of more efficient arrangement of a cascade scheme for processing composite materials using a disk extruder. Theoretical and experimental studies have shown that melting processes are more efficient in the field of high shear rates at low pressures. Disk extruder is great option for that objective. In this scheme, it is proposed to use a dose feed disk extruder as a homogenizer, and a gear pump as a metering device which allows to reduce pressure and capacity fluctuations before forming device to less than 1%. As a result, it has been determined that the proposed design of the extrusion plant will be more energy efficient than the options on the market and will be able to significantly reduce pressure and performance fluctuations at the inlet to the forming device.

Keywords: resource and energy saving; high-speed extrusion; cascade extrusion; disk extruder; gear pump.

Table: 2. **Fig.:** 3. **References.:** 12.