

**О. В. Березюк, к. т. н., доц.; В. О. Краєвський, к. т. н., доц.**

## **ДИНАМІКА ЗРОСТАННЯ КІЛЬКОСТІ СМІТТЕСОРТУВАЛЬНИХ ЛІНІЙ В УКРАЇНІ**

*Підвищенню поширеності переробки та повторного використання сприяє сортування твердих побутових відходів. Для сортування і підготовки з метою подальшої переробки, знешкодження та утилізації нетоксичних твердих побутових відходів, що зібрані нероздільним способом, призначені сміттесортувальні лінії. Визначення регресійної залежності, яка описує динаміку збільшення кількості сміттесортувальних ліній в Україні є актуальною науково-технічною задачею. Метою дослідження є визначення регресійної залежності, яка описує динаміку збільшення кількості сміттесортувальних ліній в Україні і може бути використана під час прогнозування кількості таких ліній. Під час проведення дослідження використано метод регресійного аналізу результатів однофакторних експериментів та інших парних залежностей із вибором раціонального виду функції із шістнадцяти найпоширеніших варіантів за критерієм максимального значення коефіцієнта кореляції. Регресія проводилась на основі лінеаризувальних перетворень, які дозволяють звести нелінійну залежність до лінійної. Визначення коефіцієнтів рівнянь регресії здійснювалась методом найменших квадратів за допомогою розробленої комп'ютерної програми "RegAnaliz", яка захищена свідоцтвом про реєстрацію авторського права на твір. Отримано адекватну регресійну степеневу залежність, яка описує динаміку збільшення сміттесортувальних ліній в Україні і може бути використана під час прогнозування кількості таких ліній. Побудовано графічну залежність, що описує динаміку збільшення кількості сміттесортувальних ліній в Україні та дозволяє наочно проілюструвати цю динаміку та показати достатню збіжність теоретичних результатів з фактичними даними. Використовуючи отриману залежність спрогнозовано, що для сортування усього річного об'єму ТПВ в Україні необхідна кількість сміттесортувальних ліній за наявних темпів зростання може бути забезпечена до 2040 року.*

**Ключові слова:** *тверді побутові відходи, сортування, сміттесортувальна лінія, динаміка, регресійний аналіз.*

### **Вступ**

В протипагу твердим промисловим відходам, що підлягають переробці [1 – 5], тверді побутові відходи (ТПВ) в Україні, в основному, захоронюються на полігонах та сміттєзвалищах, забруднюючи навколишнє середовище, і лише незначна їхня частина підлягає переробці та повторному використанню [6]. Підвищенню поширеності переробки та повторного використання сприяє сортування ТПВ [7], яке дозволяє вилучити певні компоненти: макулатуру, скло, чорні і кольорові метали та полімерні матеріали. Технологічний процес сортування ТПВ являє собою послідовність технологічних операцій, що виконуються основним технологічним і допоміжним технологічним устаткуванням відповідно до етапів сортувального процесу, що дозволяє досягти розділення загальної маси ТПВ на компоненти, що перероблюється і залишок, що не перероблюється. Технологія сортування може бути впроваджена як попередня обробка сировини перед застосуванням одного із методів знешкодження ТПВ. Це дозволить значно зменшити негативний вплив на довкілля та отримати прибуток від реалізації вторинної сировини [8]. Для сортування і підготовки з метою подальшої переробки, знешкодження та утилізації нетоксичних ТПВ, що зібрані нероздільним способом, призначені сміттесортувальні лінії [9]. Процес сортування ТПВ відбувається таким чином [10]: ТПВ із сміттєвезів засипають в бункер, далі конвеєр подає його в циліндричне сито-барабан, в якому відсортовується дрібна фракція та органіка. Після цього ТПВ потрапляють в приміщення для ручного або механізованого сортування. Відсортоване сміття спрямовується на прес з метою зменшення його об'єму і утрамбовується

в тюки. Сортування сміття відбувається на такі фракції: метал, скло, пластмасу, поліетилен, папір. Відсортовані відходи потрапляють на переробку, а залишок, що не підлягає переробці, захоронюється на полігоні ТПВ.

### **Постановка проблеми**

Згідно Постанови Кабінету Міністрів України № 265 серед пріоритетних напрямів поводження з ТПВ в Україні є організація роздільного збору окремих компонентів, забезпечення застосування сучасних високоефективних сміттевозів, створення сучасних полігонів побутових відходів із знешкодженням фільтрату та утилізацією біогазу тощо [11]. В законі України від 28 лютого 2019 року № 2697-VIII “Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року” серед завдань стратегії зазначено повернення у господарський обіг ресурсоцінних матеріалів, а також заплановано до 2030 року частку відходів, що захоронюються, зменшити до 35% від загального обсягу утворених відходів [12]. Тому визначення регресійної залежності, яка описує динаміку кількості сміттесортувальних ліній в Україні і може бути використана під час прогнозування кількості таких ліній, є актуальною науково-технічною задачею.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Запатентована схема удосконаленого пристрою для сортування ТПВ [13], який дозволяє відсортовувати пружні складові від непружних та розділити пружні складові пофракційно у багатосекційний контейнер. В статті [14] наведено аналітичні залежності основних кінематичних та геометричних параметрів пристрою для сортування пружних складових ТПВ у багатосекційний контейнер, а також отримано раціональні значення основних кінематичних та геометричних параметрів пристрою для сортування пружних складових ТПВ із використанням багатосекційного контейнера. В роботах [15, 16] встановлено параметри, які впливають на процентні частки диференційовано зібраних ТПВ в різних країнах, за допомогою планування багатофакторного експерименту другого порядку побудовано математичну модель прогнозування процентних часток диференційовано зібраних ТПВ. Удосконалену прогностичну модель поширеності диференційованого збирання ТПВ в різних країнах, яка може бути поширена на ширше коло країн, включаючи Україну, наведено в статті [17]. Робота [18] присвячена визначенню регресійної залежності, що описує динаміку охоплення населених пунктів Вінницької області впровадженням роздільного збирання ТПВ та дозволяє прогнозувати кількість населених пунктів охоплених впровадженням роздільного збирання ТПВ.

Під час вивчення роботи сміттесортувальної лінії в статті [9] оцінювалась ефективність вилучення вторинної сировини, умови прибуткового її функціонування та склад ТПВ, що надходять на полігон після сортування. В результаті сортування кількість ТПВ, що надходить на полігон, значно зменшилася. Завдяки цьому термін експлуатації полігону може бути збільшено, що призведе до економного використання земельних ресурсів. Через зміну складу відходів (основним складником стали органічні відходи) навантаження на навколишнє природне середовище значно зменшилося. Завдяки цьому знижується забруднення ґрунтів, вод, підземних водоносних горизонтів та атмосферного повітря шкідливими для здоров'я людей та для довкілля речовинами.

Різновиди технічних засобів сортування ТПВ відображено в роботі [19].

В роботі [20] досліджено застосування обробки зображень при розробці ефективної автоматизованої механічної системи сортування змішаних ТПВ. Першочерговим етапом переробки є розподіл пластикових та паперових відходів. Інтелектуальна система розроблена за допомогою комп'ютерно-оптичного розпізнавання деталей із особливостями на сміттесортувальній лінії (конвеєрній стрічці). Система працює без будь-якого втручання

людини, а ефективність правильної класифікації становить щонайменше 80%. Під час проведення експерименту використовувались паперові та пластикові предмети різної форми та розміру. Запропонований алгоритм був експериментально перевірений за допомогою виготовленого прототипу паперово-пластикової системи.

В статті [21] наведено статистичні дані щодо динаміки впровадження сучасних методів та технологій у сфері поводження з ТПВ в Україні, зокрема збільшення кількості сміттесортувальних ліній в 2015 – 2019 роки. Однак конкретних математичних залежностей, що описують динаміку збільшення кількості сміттесортувальних ліній в Україні, в результаті аналізу відомих публікацій, авторами не виявлено.

### Мета і завдання статті

**Метою цієї статті** є побудова за допомогою регресійного аналізу регресійної залежності, яка описує динаміку збільшення кількості сміттесортувальних ліній в Україні і може бути використана під час прогнозування кількості таких установок.

### Методи і матеріали

Для визначення регресійної залежності, яка описує динаміку збільшення кількості сміттесортувальних ліній в Україні використано такі методи: регресійний аналіз результатів однофакторних експериментів та інших парних залежностей, комп'ютерне моделювання.

### Результати досліджень

У таблиці 1 показана динаміка збільшення кількості сміттесортувальних ліній в Україні [21 – 24] в 2013 - 2020 рр. Аналіз літературних джерел показав відсутність статистичних даних щодо кількості сміттесортувальних ліній в Україні за попередні роки. На основі даних таблиці 1 планувалось отримати парну регресійну залежність, яка описує динаміку збільшення кількості сміттесортувальних ліній в Україні.

Таблиця 1

**Кількість сміттесортувальних ліній в Україні, од., в різні роки [21-24]**

Рік	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Кількість сміттесортувальних ліній в Україні, од.	21	21	20	22	25	26	34	35

Регресія проводилась на основі лінеаризувальних перетворень, які дозволяють звести нелінійну залежність до лінійної. Визначення коефіцієнтів рівнянь регресії здійснювалась методом найменших квадратів за допомогою розробленої комп'ютерної програми "RegAnaliz" [25], яка захищена свідоцтвом про реєстрацію авторського права на твір, і детально описана в роботах [26, 27].

Програма "RegAnaliz" дозволяє проводити регресійний аналіз результатів однофакторних експериментів та інших парних залежностей із вибором раціонального виду функції із 16-ти найпоширеніших варіантів за критерієм максимального коефіцієнту кореляції зі збереженням результатів в форматі MS Excel та Bitmap.

Результати регресійного аналізу наведені в таблиці 2, де сірим кольором позначено комірку з максимальним значенням коефіцієнта кореляції  $R$ .

Отже, за результатами регресійного аналізу на основі даних таблиці 1, як найбільш, адекватну остаточно прийнято таку регресійну залежність

$$n_{\text{ССЛ}} = 20,15 + 0,05381(t - 2012)^{2,74} \quad [\text{од.}], \quad (1)$$

де  $n_{\text{ССЛ}}$  – кількість сміттесортувальних ліній в Україні, од.;

$t$  – рік.

На рис. 1 показано фактичну та теоретичну графічну залежність, яка описує динаміку збільшення кількості сміттесортувальних ліній в Україні.

Таблиця 2

**Результати регресійного аналізу динаміки збільшення кількості сміттесортувальних ліній в Україні**

№	Вид регресії	Коефіцієнт кореляції R	№	Вид регресії	Коефіцієнт кореляції R
1	$y = a + bx$	0,90510	9	$y = ax^b$	0,78490
2	$y = 1 / (a + bx)$	0,92681	10	$y = a + b \cdot \lg x$	0,76648
3	$y = a + b / x$	0,58023	11	$y = a + b \cdot \ln x$	0,76648
4	$y = x / (a + bx)$	0,92106	12	$y = a / (b + x)$	0,92681
5	$y = ab^x$	0,91810	13	$y = ax / (b + x)$	0,61389
6	$y = ae^{bx}$	0,91810	14	$y = ae^{b/x}$	0,59855
7	$y = a \cdot 10^{bx}$	0,91810	15	$y = a \cdot 10^{b/x}$	0,59855
8	$y = 1 / (a + be^{-x})$	0,52363	16	$y = a + bx^n$	0,97150

Порівняння фактичних та теоретичних даних показало, що теоретична динаміка збільшення кількості сміттесортувальних ліній в Україні, розрахована за допомогою рівняння регресії (1), несуттєво відрізняється від даних, наведених в роботах [21 – 24], що підтверджує визначену раніше достатню точність отриманої залежності.

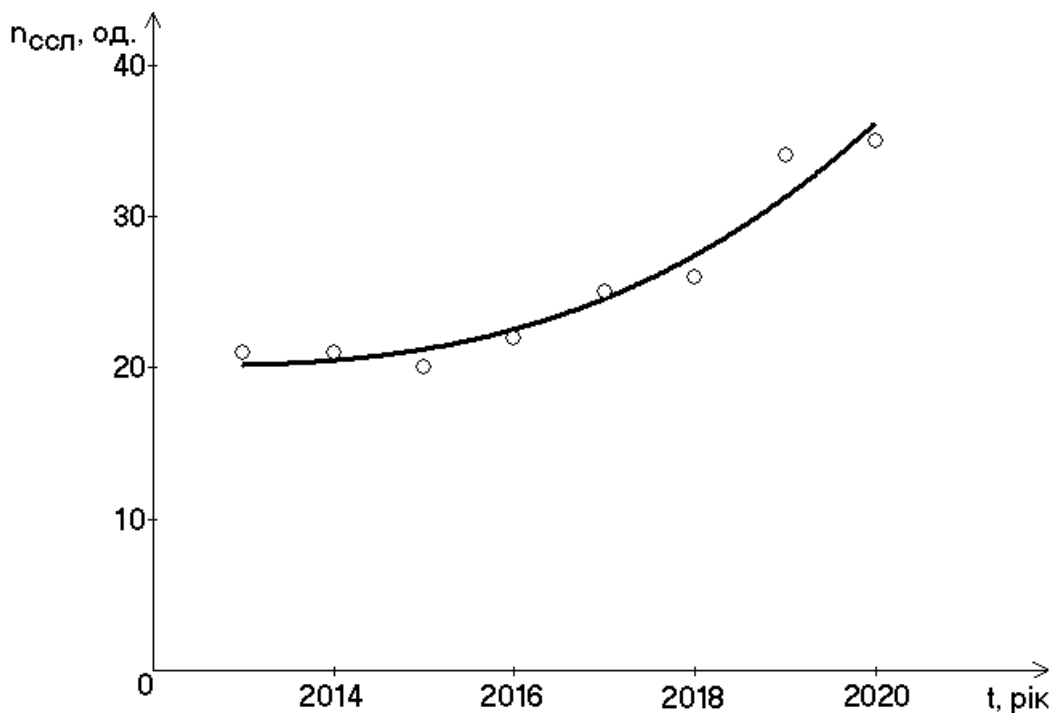


Рис. 1. Залежність, яка описує динаміку збільшення кількості сміттесортувальних ліній в Україні протягом 2013-2020 рр.: фактична  $\circ$ , теоретична —

Використовуючи залежність (1) можна спрогнозувати, що кількість сміттесортувальних ліній в Україні в 2025 році збільшиться до 81, а в 2030 році – до 168.

Прийнявши середню продуктивність однієї сміттесортувальної лінії в 50 тис. тонн в рік [10] або для середньої густини ТПВ  $210 \text{ кг/м}^3$  та коефіцієнта ущільнення у сміттевозі 2,2 [6] в перерахунку на об'єм – 108 тис.  $\text{м}^3$  в рік, можна розрахувати, що для сортування усього річного об'єму ТПВ 54 млн.  $\text{м}^3$  в Україні потрібно 500 сміттесортувальних ліній. За допомогою залежності (1) можна спрогнозувати, що така кількість сміттесортувальних ліній

в Україні за наявних темпів зростання може бути забезпечена до 2040 року.

### Висновки

1. Визначено регресійну залежність, яка описує динаміку збільшення кількості сміттесортувальних ліній в Україні і може бути використана під час прогнозування кількості таких ліній.

2. Побудовано графічну залежність, що описує динаміку збільшення кількості сміттесортувальних ліній в Україні та дозволяє наочно проілюструвати цю динаміку та показати достатню збіжність теоретичних результатів з фактичними.

3. Встановлено, що в Україні протягом 2013 – 2020 рр. кількість сміттесортувальних ліній зростала за степеневою залежністю.

4. Спрогнозовано, що для сортування усього річного об'єму ТПВ в Україні необхідна кількість сміттесортувальних ліній за наявних темпів зростання може бути забезпечена до 2040 року.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ковальський В. П. Шламосолокарбонатий прес-бетон на основі відходів промисловості / В. П. Ковальський, А. В. Бондарь // Тези доповідей XXIV міжнародної науково-практичної конференції, Харків, 18-20 травня 2015 р. – Харків, НТУ «ХП», 2015. – С. 209.
2. Лемешев М. С. В'яжучі з використанням промислових відходів Вінниччини / М. С. Лемешев // Тези доповідей XXIV міжнародної науково-практичної конференції "Інформаційні технології : наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я", Харків, 18-20 травня 2016 р. – Харків : НТУ "ХП". – С. 381.
3. Очеретний В. П. Використання відходів вапняку та промислових відходів у виробництві сухих будівельних сумішей / В. П. Очеретний, В. П. Ковальський, А. В. Бондар // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2009. – № 1. – С. 36 – 40.
4. Лемішко К. К. Використання промислових відходів енергетичної та хімічної галузі в технології виготовлення будівельних виробів / К. К. Лемішко, М. Ю. Стаднічук, М. С. Лемешев // Матеріали науково-практичної конференції "Енергія. Бізнес. Комфорт", 26 грудня 2018 р. – Одеса : ОНАХТ, 2019. – С. 23 – 25.
5. В'яжуче на основі промислових відходів [Електронний ресурс] / М. С. Лемешев // Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития '2017 : материалы международной научно-практической Интернет-конференции, 10-17 октября 2017 г. – Москва (Россия) : SWorld, 2017. – 6 с. – Режим доступа : <http://www.sworld.com.ua/index.php/ru/artsarchitecture-and-construction-317/modern-construction-technologies-317/29547-317-027>.
6. Савуляк В. І. Технічне забезпечення збирання, перевезення та підготовки до переробки твердих побутових відходів : монографія / В. І. Савуляк, О. В. Березюк. – Вінниця, 2006. – 217 с
7. Попович В. В. Особливості використання транспортних засобів під час транспортування, сортування, утилізації та фітомеліорації твердих побутових відходів / В. В. Попович // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2012. – Вип. 22.10. – С. 90 – 96.
8. Ісяєв С. Д. Досвід сортування твердих побутових відходів у місті Києві / С. Д. Ісяєв, В. В. Янишпольська, І. С. Петухов // Наукові записки. – 2000. – Т. 18. Біологія та екологія. – С. 73 – 76.
9. Тихонова К. Ю. Система роздільного збору та сортування ТПВ. Функціонування сортувальної лінії сміття у Золочівському районі Львівської області / К. Ю. Тихонова // Инновационные пути модернизации базовых отраслей промышленности, энерго- и ресурсосбережение, охрана окружающей природной среды : сборник научных трудов VI Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, 22-23 марта 2017 г., г. Харьков. – Х. : ГП «УкрНТЦ «Энергосталь», 2017. – С. 258 – 261.
10. Блюй О. Проблеми сортування твердих побутових відходів на прикладі міста Тернополя / О. Блюй // Магістерські студії географічного факультету ТНПУ ім. В. Гнатюка : збірник наукових праць. – Тернопіль : ТНПУ ім. В. Гнатюка, 2020. Вип. 1 (3). – С. 130 – 134.
11. Постанова Кабінету Міністрів України від 4 березня 2004 року № 265 «Про затвердження Програми поводження з твердими побутовими відходами» [Електронний ресурс] / Кабінет Міністрів України : <http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/265-2004-%D0%BF>.
12. Закон України «Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2020 року» // Відомості Верховної Ради України. – 2011. – № 26. – С. 218.
13. Патент України 92719 U, МПК (2014.01) В 07 В 13/00. Пристрій для сортування твердих побутових відходів / Березюк О. В.; заявник та патентовласник Березюк О. В. – № u201404117; заявл. 16.04.2014. опубл. 26.08.2014, Бюл. № 16.

14. Березюк О. В. Дослідження кінематики пристрою для сортування твердих побутових відходів / О. В. Березюк // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – 2010. – № 65. – С. 49 – 55.
15. Березюк О. В. Визначення параметрів впливу на частку диференційовано зібраних твердих побутових відходів / О. В. Березюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 5. – С. 154 – 156.
16. Березюк О. В. Техніко-економічні показники машин та процесів в сфері менеджменту твердими побутовими відходами / О. В. Березюк // Розвиток фінансового менеджменту в умовах хаотичного структурування економіки : колективна монографія / за заг. наук. ред. С. А. Кузнецової. – Дніпропетровськ : Акцент ПП, 2015. – 277 с. – С. 109 – 120.
17. Березюк О. В. Усовершенствование прогностической модели распространенности дифференцированного сбора твердых бытовых отходов / О. В. Березюк // Стратегические направления развития АПК стран СНГ : материалы XVI Междунар. научно-практ. конф. Барнаул, 27-28 февр. 2017 г. – Т. 1. – Новосибирск : СФНЦА РАН, 2017. – С. 193 – 195.
18. Березюк О. В. Динаміка охоплення населених пунктів Вінницької області впровадженням роздільного збирання твердих побутових відходів / О. В. Березюк, М. С. Лемешев // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2021. – № 2. – С. 32 – 36.
19. Ключниченко Л. М. Сортировка отходов: инновации компании TERRA SELECT GMBH / Л. М. Ключниченко // Твердые бытовые отходы. – 2010. – № 4. – С. 52 – 55.
20. Razali Z. B. An application of image processing for automated mixed household waste sorting system / Z. B. Razali, S. Madasamy // International Conference on Man-Machine System (ICoMMS2012), Penang. – 2012. – V. 27. – P. 28 - 32.
21. Рашкевич Н. В. Аналіз техногенної небезпеки технологій поводження з твердими побутовими відходами / Н. В. Рашкевич // Комунальне господарство міст. – 2019. – Т. 6, Вип. 152. – С. 58 – 66.
22. Стан сфери поводження з побутовими відходами в Україні за 2013 рік [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.minregion.gov.ua/napryamki-diyalnosti/zhkh/terretory/stan-sferi-povodzhennya-z-pobutovimi-vidhodami-v-ukrayini-za-2013-rik/>.
23. Стан сфери поводження з побутовими відходами в Україні за 2014 рік [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.minregion.gov.ua/napryamki-diyalnosti/zhkh/terretory/stan-sferi-povodzhennya-z-pobutovimi-vidhodami-v-ukrayini-za-2014-rik/>.
24. Стан сфери поводження з побутовими відходами в Україні за 2020 рік [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.minregion.gov.ua/napryamki-diyalnosti/zhkh/terretory/stan-sfery-povodzhennya-z-pobutovymy-vidhodamy-v-ukrayini-za-2020-rik/>.
25. Березюк О. В. Комп'ютерна програма "Регресійний аналіз" ("RegAnaliz") / О. В. Березюк // Свідectво про реєстрацію авторського права на твір № 49486. – К. : Державна служба інтелектуальної власності України. – Дата реєстрації: 03.06.2013.
26. Березюк О. В. Определение регрессии коэффициента уплотнения твердых бытовых отходов от высоты полигона на основе компьютерной программы "RegAnaliz" / О. В. Березюк // Автоматизированные технологии и производства. – 2015. – № 2 (8). – С. 43 – 45.
27. Березюк О. В. Встановлення регресій параметрів захоронення відходів та потреби в ущільнювальних машинах на основі комп'ютерної програми "RegAnaliz" / О. В. Березюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2014. – № 1. – С. 40 – 45.

Стаття надійшла до редакції 13.06.2021.

Стаття пройшла рецензування 22.06.2021.

**Березюк Олег Володимирович** – к. т. н., доцент, доцент кафедри безпеки життєдіяльності та педагогіки безпеки.

**Краєвський Володимир Олександрович** – к. т. н., доцент, доцент кафедри вищої математики. Вінницький національний технічний університет.