

ДИНАМІКА ПОШИРЕНOSTІ МЕТОДІВ СПАЛЮВАННЯ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ В УКРАЇНІ

Вінницький національний технічний університет

З метою вирішення проблеми твердих побутових відходів у розвинутих країнах поширене їхнє спалювання на сміттєспалювальних заводах. Тому визначення регресійної залежності, що описує динаміку поширеності методів спалювання твердих побутових відходів в Україні для вирішення проблеми поводження з твердими побутовими відходами, є актуальною науково-технічною задачею. Метою дослідження є визначення за допомогою регресійного аналізу залежностей, які описують динаміку поширеності методів спалювання твердих побутових відходів в Україні для вирішення проблеми поводження з ТПВ. Під час дослідження використано метод регресійного аналізу результатів однофакторних експериментів та інших парних залежностей з вибором адекватнішого виду функції з 16 найпоширеніших варіантів за критерієм максимального коефіцієнта кореляції. Регресія проводилась на основі лінеаризувальних перетворень, які дозволяють звести нелінійну залежність до лінійної. Визначення коефіцієнтів рівняння регресії здійснювалось методом найменших квадратів за допомогою розробленої комп'ютерної програми "RegAnaliz", яка захищена свідоцтвом про реєстрацію авторського права на твір. Отримано адекватні регресійні залежності, що описують динаміку поширеності методів спалювання твердих побутових відходів в Україні. Побудовано графічну залежність, що описує динаміку поширеності методів спалювання твердих побутових відходів в Україні, та дозволяє наочно проілюструвати цю динаміку, показати достатню збіжність теоретичних та фактичних результатів. Встановлено, що в Україні протягом 2012—2019 рр. поширеність спалювання твердих побутових відходів з метою отримання енергії зростала за гіперболічно-експоненціальною залежністю, а поширеність спалювання твердих побутових відходів без отримання енергії — спадала за експоненціально-гіперболічною залежністю. Спрогнозовано, що в Україні в 2031 році серед методів спалювання ТПВ поширеність спалювання з метою отримання енергії за відповідних умов може скласти 99,66 %, а без отримання енергії — 0,34 %.

Ключові слова: динаміка, статистичні дані, поширеність, спалювання, тверді побутові відходи, регресійний аналіз.

Вступ

Питання забруднення довкілля твердими побутовими та промисловими відходами висвітлено у низці публікацій [1]—[7]. Щорічно у містах і селищах міського типу України утворюється понад 54 млн м³ твердих побутових відходів (ТПВ), 93,8 % яких вивозяться на полігони і сміттєзвалища, 4,2 % ТПВ потрапляє на заготівельні пункти вторинної сировини та сміттєпереробні заводи, а 2 % спалюється на сміттєспалювальних заводах [8]. Через здорожчання органічного палива, особливо природного газу, в Україні стає актуальнішою проблема використання ТПВ як енергетичного палива. Тому в таких розвинутих країнах, як Данія та Нідерланди поширеність сміттєспалювання складає 54,3 % і 36,6%, відповідно [9]. Лише протягом 1995—2014 рр. поширеність спалювання ТПВ у ЄС збільшилася майже удвічі [10]. Разом з тим, утилізувати ТПВ доцільно на наявних комунальних ТЕЦ з генерувальною потужністю 12 МВт, що можуть працювати на енергетичному паливі (суміші ТПВ, зневоднених до 20 % відносної вологості та кам'яного вугілля з масовою часткою 16 %) із розрахунковою нижчою теплотою згорання 10,99 МДж/кг [11]. Тому визначення регресійних залежностей, що описують динаміку поширеності методів спалювання ТПВ в Україні

для вирішення проблеми поводження з твердими побутовими відходами є актуальною науково-технічною задачею.

В статті [12] наведені регресійні моделі поширеності таких способів поводження з ТПВ як захоронення та спалювання. Зниження відносної вологості цукрової тростини з 42 % до 10 % під час спалювання в печі з нерухомим шаром дозволяє скоротити тривалість спалювання в 3,4...6 разів [13]. В роботі [14] доведена неможливість самостійного горіння ТПВ з вологістю, з якою вони потрапляють зі сміттєвозів до сміттєспалювального заводу, що вказує на необхідність їхнього зневоднення перед спалюванням, а також виявлено, що зменшення відносної вологості ТПВ на 25...40 % призводить до збільшення їхньої питомої теплоти згорання в 1,6...2,2 рази. Нижча теплота згорання ТПВ становить 6,285...8,38 МДж/кг, а за умови зменшення вологості ТПВ з 43 % до 20 % нижча теплота згорання ТПВ становить 9,14 МДж/кг, розрахункова нижча теплота згорання суміші вугілля і ТПВ — 10,99 МДж/кг [11]. В статті [15] за допомогою запропонованого вологоміра [16] проведено дослідження процесів зневоднення ТПВ шнековим пресом за допомогою планування експерименту другого порядку, яке дало змогу визначити адекватні квадратичні регресійні моделі показників зневоднення від основних параметрів впливу. В роботі [17] запропоновано схему гідроприводу зневоднення та ущільнення ТПВ у сміттєвозі під час їхнього завантаження. Виявлення властивостей горіння ТПВ у нерухомому шарі [18] встановило таку залежність швидкості горіння від розміру частинок: зменшення середнього розміру частинок з 30 до 10 мм збільшує швидкість розповсюдження полум'я з 0,6 см/хв до 0,8 см/хв, що, зі свого боку, значно збільшує швидкість спалювання ТПВ і, таким чином, забезпечує максимальну продуктивність спалювання відходів і досягнення повного згорання. В статті [19] проведено дослідження процесу подрібнення ТПВ під час зневоднення та попереднього ущільнення шнековим пресом за допомогою планування експерименту другого порядку, що дало змогу визначити адекватні квадратичні регресійні моделі показників подрібнення від основних параметрів впливу, які використані під час створення методики інженерних розрахунків параметрів машин та механізмів для подрібнення як складової науково-технічних основ проектування приводів робочих органів машин для збирання та первинної переробки твердих побутових відходів. Залежність поширеності спалювання ТПВ з утилізацією енергії в розвинутих країнах від факторів впливу (густота населення країни, величина валового внутрішнього продукту на душу населення, індекс розвитку людського потенціалу, середня географічна широта країни) досліджена в статті [20]. В роботі [21] наведено статистичні дані щодо поширеності методів спалювання ТПВ в Україні в 2012—2019 роки. Однак конкретних математичних залежностей, що описують динаміку поширеності методів спалювання ТПВ в Україні, в результаті аналізу відомих публікацій, авторами не виявлено.

Метою дослідження є визначення за допомогою регресійного аналізу залежності, що описує динаміку поширеності методів спалювання ТПВ в Україні для вирішення проблеми поводження з твердими побутовими відходами.

Результати досліджень

В табл. 1 подано статистичні дані щодо поширеності методів спалювання ТПВ в Україні в різні роки [21], які свідчать про економічно-доцільну тенденцію поступового збільшення поширеності спалювання ТПВ з метою отримання енергії та поступового зменшення поширеності спалювання ТПВ без отримання енергії. Варто зазначити, що у табл. 1 наведені дані лише для поширеності саме різновидів методу спалювання ТПВ (з метою отримання енергії та без отримання енергії) без розгляду інших методів поводження з ТПВ (захоронення, переробка, повторне використання, компостування). Тобто за 100 % вважаються усі спалені ТПВ, а не усі утворені відходи.

Таблиця 1

Статистичні дані щодо поширеності методів спалювання ТПВ в Україні [21]

Рік	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Спалено ТПВ з метою отримання енергії, тис. т	149,9	147,6	149	254,3	257,3	244,4	205,5	198,5
Спалено ТПВ без отримання енергії, тис. т	78,6	2,9	3,8	2,1	2	1,2	1	1
Поширеність спалювання ТПВ з метою отримання енергії, %	65,61	98,07	97,51	99,18	99,23	99,51	99,52	99,50
Поширеність спалювання ТПВ без отримання енергії, %	34,40	1,927	2,487	0,819	0,7713	0,4886	0,4843	0,5013

На основі даних табл. 1 планувалось отримати математичні моделі у вигляді парних регресійних залежностей поширеності методів спалювання ТПВ в Україні.

Регресія проводилась на основі лінеаризувальних перетворень, які дозволяють звести нелінійну залежність до лінійної. Під час дослідження використано метод регресійного аналізу результатів однофакторних експериментів та інших парних залежностей з вибором найадекватнішого виду функції з 16 найпоширеніших варіантів за критерієм максимального значення коефіцієнта кореляції зі збереженням результатів в форматі MS Excel та Bitmap. Визначення коефіцієнтів рівнянь регресії здійснювалась методом найменших квадратів [22] за допомогою розробленої комп'ютерної програми RegAnaliz, яка захищена свідоцтвом про реєстрацію авторського права на твір [23] і детально описана в роботі [24].

Результати регресійного аналізу подані в табл. 2.

Таблиця 2

Результати регресійного аналізу динаміки поширеності методів спалювання ТПВ в Україні

№	Вид регресії	Коефіцієнт кореляції R		№	Вид регресії	Коефіцієнт кореляції R	
		з метою отримання енергії	без отримання енергії			з метою отримання енергії	без отримання енергії
1	$y = a + bx$	0,61874	0,61874	9	$y = ax^b$	0,78909	0,94210
2	$y = 1/(a + bx)$	0,60522	0,95555	10	$y = a + b \cdot \lg x$	0,79477	0,79477
3	$y = a + b/x$	0,92817	0,92817	11	$y = a + b \cdot \lg x$	0,79477	0,79477
4	$y = x/(a + bx)$	0,93831	0,97335	12	$y = a/(b + x)$	0,60522	0,95555
5	$y = ab^x$	0,61157	0,83658	13	$y = ax/(b + x)$	0,92191	0,82986
6	$y = ae^{bx}$	0,61157	0,83658	14	$y = ae^{b/x}$	0,92488	0,97767
7	$y = a \cdot 10^{bx}$	0,61157	0,83658	15	$y = a \cdot 10^{b/x}$	0,92488	0,97766
8	$y = 1/(a + b^{-x})$	0,94410	0,76973	16	$y = a + bx^n$	0,48087	0,48087

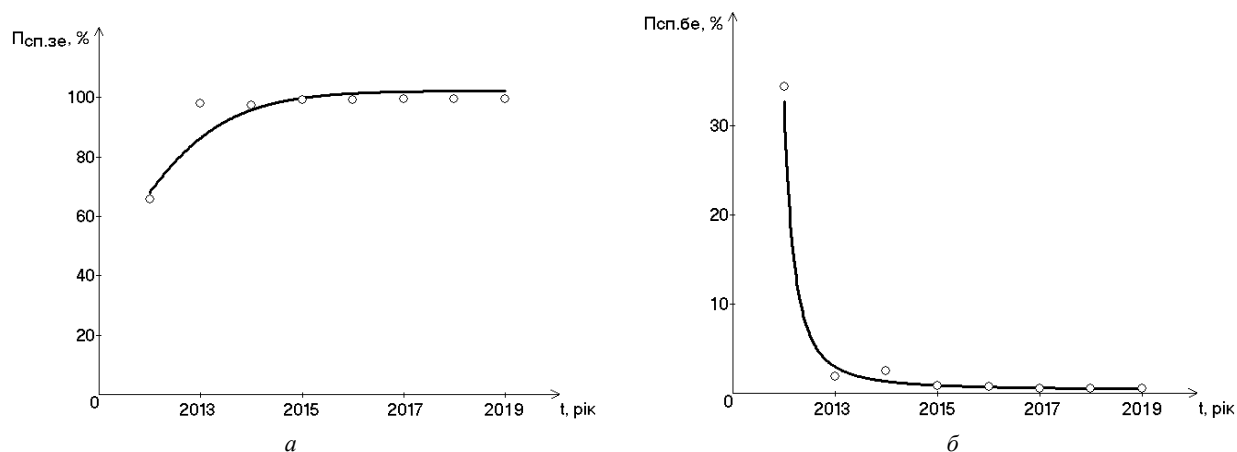
Отже, за результатами регресійного аналізу на основі даних табл. 1, як найадекватніші остаточно вважатимемо такі регресійні моделі:

$$P_{\text{сп.зе}} = \frac{1}{0,010035 + 0,01343e^{2011-t}} \quad [\%]; \quad (1)$$

$$P_{\text{сп.бе}} = 0,2673e^{\frac{4,808}{t-2011}} \quad [\%], \quad (2)$$

де $P_{\text{сп.зе}}$ — поширеність спалювання ТПВ з метою отримання енергії, %; $P_{\text{сп.бе}}$ — поширеність спалювання ТПВ без отримання енергії, %; t — рік.

На рисунку показано графічні залежності, що описують динаміку поширеності методів спалювання ТПВ в Україні, побудовані за допомогою рівнянь регресії (1), (2). Вони підтверджують визначену раніше достатню збіжність отриманих теоретичних залежностей порівняно з даними, наведеними в роботі [21].



Залежності, які описують: \circ — фактичну; — — теоретичну динаміку поширеності методів спалювання ТПВ в Україні; a — з метою отримання енергії; b — без отримання енергії

Аналіз графічних залежностей на рис. показав, що в Україні протягом 2012—2019 рр. поширеність спалювання ТПВ з метою отримання енергії зростала за гіперболічно-експоненціальною

залежністю, а поширеність спалювання ТПВ без отримання енергії — спадала за експоненціально-гіперболічною залежністю.

Використовуючи залежності (1) і (2), можна спрогнозувати, що в Україні в 2031 році серед методів спалювання ТПВ поширеність спалювання з метою отримання енергії за відповідних умов може скласти 99,66 %, а без отримання енергії — 0,34 %.

Висновки

1. Визначено регресійні залежності, що описують динаміку поширеності методів спалювання ТПВ в Україні та дозволяють прогнозувати цю динаміку. Це необхідно для вирішення проблеми поводження з твердими побутовими відходами.

2. Побудовано графічні залежності, які описують динаміку поширеності методів спалювання ТПВ в Україні та дозволяють наочно проілюструвати цю динаміку, показати достатню збіжність теоретичних та фактичних результатів.

3. Встановлено, що в Україні протягом 2012—2019 рр. поширеність спалювання ТПВ з метою отримання енергії зростала за гіперболічно-експоненціальною залежністю, а поширеність спалювання ТПВ без отримання енергії — спадала за експоненціально-гіперболічною залежністю.

4. Спрогнозовано, що в Україні у 2031 році серед методів спалювання ТПВ поширеність спалювання з метою отримання енергії за відповідних умов може скласти 99,66 %, а без отримання енергії — 0,34 %.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] В. И. Колесников, К. Ш. Казеев, и В. Ф. Вальков, «Влияние загрязнения тяжелыми металлами на экологические свойства чернозема обыкновенного,» *Экология*, № 3, с. 193-201, 2000.
- [2] В. П. Ковальський, і О. С. Сідлак, «Використання золи виносу ТЕС у будівельних матеріалах,» *Сучасні технології, матеріали і конструкції у будівництві*, № 1 (16), с. 35-40, 2014.
- [3] В. В. Попович, О. В. Придатко, М. І. Сичевський, Н. П. Попович, і М. А. Панасюк, «Ефективність експлуатації сміттєвозів у середовищі "місто-сміттєзвалище",» *Науковий вісник НЛТУ України*, т. 27, № 10, с. 111-116, 2017.
- [4] В. П. Ковальський, і А. В. Бондарь, «Шламозолокарбонатий прес-бетон на основі відходів промисловості,» на *XXIV Міжнар. наук.-практ. конф. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*, Харків, 2015, с. 209.
- [5] О. А. Сагдеева, Г. В. Крусір, і А. Л. Цикало, «Оцінка рівня екологічної небезпеки звалищ твердих муніципальних відходів,» *Екологічна безпека*, № 1, с. 75-83, 2018.
- [6] В. І. Савуляк, і О. В. Березюк, *Технічне забезпечення збирання, перевезення та підготовки до переробки твердих побутових відходів*, моногр., Вінниця: ВНТУ, 2006, 217 с.
- [7] O. Bereziuk, M. Lemeshev, V. Bogachuk, W. Wójcik, K. Nurseitova, and A. Bugubayeva, "Ultrasonic microcontroller device for distance measuring between dustcart and container of municipal solid wastes," *Przegląd Elektrotechniczny*, no. 4, p. 146-150, 2019. <http://dx.doi.org/10.15199/48.2019.04.26>.
- [8] Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України (2018). *Стан сфери поводження з побутовими відходами в Україні за 2018 рік*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.minregion.gov.ua/napryamki-diyalnosti/zhkh/terretory/stan-sferi-povodzhennya-z-pobutovimi-vidhodami-v-ukrayini-za-2018-rik/>.
- [9] Т. А. Орлова, «Экологическая оценка земельных участков, занятых объектами обращения с отходами,» *Містобудування та територіальне планування*, наук.-техн. зб., вип. 25, с. 167-181, 2006.
- [10] О. В. Березюк, В. О. Краєвський, і Л. Л. Березюк, «Динаміка поширеності методів поводження з твердими побутовими відходами в ЄС,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с. 104-109, 2020. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-148-1-104-109>.
- [11] В. К. Рижий, Т. І. Римар, і І. Л. Тимофеев, «Утилізація твердих побутових відходів на наявних комунальних ТЕЦ,» *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*, № 712: Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація, с. 17-22, 2011.
- [12] О. В. Березюк, «Визначення параметрів впливу на шляхи поведінки з твердими побутовими відходами,» *Сучасні технології, матеріали і конструкції у будівництві*, наук.-техн. зб., № 2 (10), с. 64-66, 2011.
- [13] C. Z. Sánchez, P. Gauthier-Maradei, and H. H. Escalante, "Effect of particle size and humidity on sugarcane bagasse combustion in a fixed bed furnace," *Revista ION*, vol. 26, no. 2, p. 73-85, 2013.
- [14] О. І. Сігал, та ін., «Дослідження кількості теплоти, що виділяється при спалюванні змішаних твердих побутових відходів м. Києва,» *Промышленная теплотехника*, т. 39, № 3, с. 78-84, 2017.
- [15] О. В. Березюк, «Експериментальне дослідження процесів зневоднення твердих побутових відходів шнековим пресом,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 5, с. 18-24, 2018. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2018-140-5-18-24>.
- [16] O. V. Bereziuk, M. S. Lemeshev, V. V. Bohachuk, and M. Duk, "Means for measuring relative humidity of municipal solid wastes based on the microcontroller Arduino UNO R3", *Proc. SPIE, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2018*, vol. 10808, no. 108083G, 2018. <https://doi.org/10.1117/12.2501557>.
- [17] О. В. Березюк, «Гідропривід зневоднення та ущільнення твердих побутових відходів у сміттєвозі,» *Патент України В65F 3/00. № 109036 МПК(2016.01)*, 10.08.2016.
- [18] D. Shin, and S. Choi, "The Combustion of Simulated Waste Particles in a Fixed Bed," *Combustion and Flame*, vol. 121, pp. 167-180, 2000.

[19] О. В. Березюк, «Експериментальне дослідження процесу подрібнення твердих побутових відходів під час зневоднення шнековим пресом,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 5, С. 75-80, 2019. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2019-146-5-75-80> .

[20] О. В. Березюк, і М. С. Лемешев, «Поширеність спалювання твердих побутових відходів з утилізацією енергії,» *Сучасні технології, матеріали і конструкції у будівництві*, наук.-техн. зб., № 2 (23), с. 128-132, 2017.

[21] Рахункова палата (2017, Жовт. 26. *Звіт про результати аудиту впровадження системи поводження з побутовими відходами та ефективності використання коштів державного бюджету у цій сфері.* [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://rp.gov.ua/upload-files/Activity/Collegium/2017/22-1_2017/Zvit_22-1_2017.pdf .

[22] В. М. Михалевич, О. І. Шевчук, і Н. Л. Буга, «Математичні системи комп'ютерної алгебри як засіб підвищення ефективності і якості освітнього процесу з вищої математики,» *Сучасні інформаційні технології та інноваційні методи навчання у підготовці фахівців: методологія, теорія, досвід, проблеми*, зб. наук. пр., вип. 14, с. 357-360, 2007.

[23] О. В. Березюк, «Комп'ютерна програма "Регресійний аналіз" ("RegAnaliz"),» *Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 49486*, Київ: Державна служба інтелектуальної власності України, дата реєстрації: 03.06.2013.

[24] О. В. Березюк, «Определение регрессии коэффициента уплотнения твердых бытовых отходов от высоты полигона на основе компьютерной программы "RegAnaliz",» *Автоматизированные технологии и производства*, № 2 (8), с. 43-45, 2015.

Рекомендована кафедрою будівництва, міського господарства та архітектури ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 29.11.2021

Березюк Олег Володимирович — д-р техн. наук, доцент, доцент кафедри безпеки життєдіяльності та педагогіки безпеки, e-mail: berezyukoleg@i.ua ;

Лемешев Михайло Степанович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

O. V. Bereziuk¹
M. S. Lemeshev¹

Prevalence Dynamics of MSW Incineration Methods in Ukraine

¹Vinnitsia National Technical University

In order to solve the problem of municipal solid waste in developed countries, it is common to incinerate it in incinerators. Therefore, the definition of regression dependence, which describes the dynamics of the prevalence of municipal solid waste incineration methods in Ukraine to solve the problem of municipal solid waste management, is an urgent scientific and technical task. The aim of the study is to determine, by regression analysis, the dependences that describe the dynamics of the prevalence of municipal solid waste incineration methods in Ukraine to solve the problem of municipal solid waste management. The method of regression analysis of the results of one-factor experiments and other pair dependences with the choice of a more adequate type of function from the 16 most common variants by the criterion of the maximum correlation coefficient was used during the research. The regression was performed on the basis of linearizing transformations, which allow reducing the nonlinear dependence to the linear one. The coefficients of the regression equation were determined by the method of least squares with the help of the developed computer program "RegAnaliz", which is protected by the copyright registration certificate for the work. Adequate regression dependences describing the dynamics of the prevalence of municipal solid waste incineration methods in Ukraine are obtained. A graphical dependence is constructed, which describes the dynamics of the prevalence of municipal solid waste incineration methods in Ukraine and allows illustrating this dynamics, to show a sufficient convergence of theoretical and actual results. It is established that in Ukraine during 2012—2019 the prevalence of municipal solid waste incineration for energy purposes increased exponentially, and the prevalence of non-municipal solid waste incineration — decreased exponentially hyperbolic. It is projected that in Ukraine in 2031 among the methods of solid waste incineration, the prevalence of incineration for energy under appropriate conditions may be 99,66 %, and without energy — 0,34 %.

Keywords: dynamics, statistics, prevalence, incineration, municipal solid waste, regression analysis.

Bereziuk Oleh V. — Dr. Sc. (Eng.), Associated Professor, Associated Professor of the Chair of Security of Life and Pedagogic of Security, e-mail: berezyukoleg@i.ua ;

Lemeshev Mykhailo S. — Cand. Sc. (Eng.), Associated Professor, Associated Professor of the Chair of Construction, Urban Economy and Architecture