

УДК 628.472.3; 628.4.08

**О. В. Березюк, к. т. н., доц.; С. М. Горбатюк, к. б. н., доц.; Л. Л. Березюк****ДИНАМІКА ЗМЕНШЕННЯ МАСИ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ  
ПРИ БІОРОЗКЛАДАННІ**

*В Україні протягом останніх років значно зросла сумарна площа полігонів твердих побутових відходів та сміттєзвалищ, в тому числі й перевантажених, які порушують норми екологічної безпеки та є об'єктами інтенсивного екологічного навантаження. Це загрожує забрудненням навколишнього середовища шкідливими речовинами (важкими металами, мікроорганізмами (бактеріями кишкової палички, стрептококами, стафілококами та аскаридами), високотоксичним фільтратом, звалищним газом тощо), спричиняючи захворювання людей. Визначення регресійної залежності маси залишкової частини ТПВ на 1 кг від тривалості біорозкладання є актуальною науково-технічною задачею. Метою дослідження є визначення регресійної залежності маси залишкової частини ТПВ на 1 кг від тривалості біорозкладання. Під час проведення дослідження використано метод регресійного аналізу результатів однофакторних експериментів та інших парних залежностей із вибором кращого 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 гіперболічну залежність маси залишкової частини твердих побутових відходів на 1 кг від тривалості біорозкладання, яку використано для прогнозування тривалості біорозкладання ТПВ до певної залишкової маси, і яка може бути використана для визначення раціональної періодичності проведення рекультиваційних заходів на полігоні їхнього захоронення. Побудовано графічну інтерпретацію динаміки залишкової частини твердих побутових відходів на 1 кг від тривалості біорозкладання, яка дозволяє наочно проілюструвати цю залежність та показати достатню збіжність теоретичних результатів з фактичними.*

**Ключові слова:** сміттєзвалище, полігон, тверді побутові відходи, біорозкладання, динаміка, зменшення маси, регресійний аналіз.

**Вступ**

Велику небезпеку для охорони здоров'я та безпеки навколишнього середовища становлять тверді побутові відходи (ТПВ) [1], особливістю яких є те, що вони є сумішшю компонентів, на відміну від будівельних відходів, які, переважно, є однорідними й відносно легко піддаються переробці [2, 3]. Щорічний об'єм утворення ТПВ на території України становить більше ніж 54 млн. м<sup>3</sup>, основна частина яких захоронюється на 6107 полігонах та сміттєзвалищах площею майже 7700 га та лише частково переробляється або утилізується на сміттєспалювальних заводах, на відміну від високорозвинутих країн, відомих широким впровадженням сучасних технологій переробки та утилізації ТПВ [4]. За період 1999 - 2014 рр. втричі збільшилась сумарна площа полігонів та сміттєзвалищ в Україні. Майже вдвічі зросла площа перевантажених та більше ніж втричі тих полігонів і сміттєзвалищ, які порушують норми екологічної безпеки, загрожуючи забрудненням навколишнього середовища шкідливими речовинами, зокрема й через забруднення ґрунтів важкими металами, які разом із фільтратом можуть потрапляти до підземних вод, забруднюючи їх, що становить загрозу для безпеки життя, здоров'я та діяльності людини. Також сміттєзвалища є об'єктами інтенсивного екологічного навантаження на навколишнє середовище та можуть становити небезпеку забруднення мікроорганізмами (бактеріями кишкової палички, стрептококами, стафілококами та аскаридами) прилеглих земельних

ділянок [5], що є збудниками та переносниками хвороб [6]. Місця захоронення ТПВ завдяки біологічним процесам, які відбуваються в товщі відходів, є також джерелами тривалого негативного впливу на навколишнє середовище звалищним газом, який містить парникові гази та токсичні речовини [7] та високотоксичним фільтратом [8, 9]. Тому для зменшення темпів зростання площ полігонів та їхнього негативного впливу на навколишнє середовище виконують технологічну операцію ущільнення ТПВ під час завантаження в сміттєвоз [10, 11]. У середовищі ТПВ поряд із патогенними бактеріями – носіями різних захворювань наявні також сапрофітні аеробні бактерії, завдяки яким відбуваються біохімічні реакції розкладання органічної фракції ТПВ в місцях їхнього захоронення та самоочищення ґрунту від чужорідних органічних речовин, в результаті чого поступово зменшується об'єм та маса захоронених ТПВ [12 – 14].

### **Постановка проблеми**

Відповідно Постанові Кабінету Міністрів України № 265 серед пріоритетних напрямів поведінки з ТПВ в Україні є забезпечення організації контролю за діючими та закритими полігонами ТПВ для запобігання шкідливому впливу на довкілля та здоров'я людини [15]. Тому визначення регресійної залежності маси залишкової частини ТПВ на 1 кг від тривалості біорозкладання, яка може бути використана для визначення раціональної періодичності проведення рекультиваційних заходів на полігоні їхнього захоронення, є актуальною науково-технічною задачею.

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

Прогностичні математичні моделі об'ємів утворення ТПВ та площ полігонів і сміттєзвалищ в Україні наведено в статті [16], за допомогою яких встановлено, що загальна площа полігонів та сміттєзвалищ, а також тих, що не відповідають нормам екобезпеки збільшується з часом приблизно за експоненціальним законом. Площа перевантажених полігонів та сміттєзвалищ, як тих, що відповідають, так і тих, що не відповідають нормам екобезпеки зростає щорічно майже лінійно. Для зменшення темпів зростання площ полігонів виконується технологічна операція ущільнення ТПВ під час завантаження у сміттєвоз [10, 11]. Завдяки високому коефіцієнту ущільнення ТПВ забезпечується більш ефективно використання площі полігона [17, 18]. В роботі [13] наведені дані щодо концентрацій сапрофітних бактерій у 0-20 см шарі дерново-слабопідзолистого ґрунту, прилеглого до полігонів захоронення ТПВ, а також встановлено, що збільшення кількості та концентрації важких металів у ґрунті під час його полікомпонентного забруднення зумовлює зниження загальної кількості мікроорганізмів і біологічної активності ґрунту. Автори статті [19] наводять дані щодо зміни санітарно-бактеріологічного складу ТПВ під час компостування. В статті [5] виявлено ширшу номенклатуру санітарно-бактеріологічного складу ТПВ навесні (бактерії кишкової палички, стрептококи, стафілококи та аскариди) завдяки наявності стафілококів та аскарид, відсутніх у ТПВ під час літнього компостування. В роботі [20] вказано про значне забруднення важкими металами ґрунтів через захоронення ТПВ. Моделювання питомих енерговитрат очищення ґрунтів полігонів ТПВ від забруднення важкими металами проведено в статті [21], в результаті чого запропоновано логарифмічні регресійні залежності питомих енерговитрат очищення ґрунтів полігонів ТПВ через забруднення важкими металами від зменшення концентрацій кадмію, свинцю та цинку, які використані для побудови математичної моделі питомих енерговитрат очищення ґрунтів полігонів від забруднення важкими металами. В роботі [22] за допомогою методу планування багатофакторного експерименту Бокса-Уїлсона визначено регресійну залежність активності біологічних процесів у ТПВ від ступеня їхнього ущільнення з часом, за допомогою якої встановлено, що найбільше активність біологічних процесів у ТПВ залежить від їхньої

густини, найменше – від часу. В статті [23] удосконалено математичну модель у вигляді логарифмічної залежності концентрацій забруднювальних речовин у фільтраті полігонів ТПВ. В роботі [24] побудовано математичні моделі залежності концентрацій сапрофітних бактерій у ґрунті від відстані до полігону захоронення ТПВ, які дали змогу встановити, що з наближенням полігону суттєво знижується концентрація сапрофітних аеробних бактерій, необхідних для біохімічних реакцій розкладання органічної фракції ТПВ в місцях їхнього захоронення та самоочищення ґрунту від чужорідних органічних речовин. В роботі [25] встановлено, що негативний вплив сміттєзвалищ на довкілля суттєво впливає на умови проживання населення, включаючи показники здоров'я, а також наведено експериментальні дані щодо зміни маси залишкової частини ТПВ на 1 кг під час біорозкладання. Однак конкретних математичних залежностей маси залишкової частини ТПВ на 1 кг від тривалості біорозкладання, в результаті аналізу відомих публікацій, авторами не виявлено.

### Мета і завдання статті

**Метою цієї статті** є побудова за допомогою регресійного аналізу регресійної залежності маси залишкової частини ТПВ на 1 кг від тривалості біорозкладання, яка може бути використана для визначення раціональної періодичності проведення рекультиваційних заходів на полігоні їхнього захоронення.

### Методи і матеріали

Для визначення регресійної залежності маси залишкової частини ТПВ на 1 кг від тривалості біорозкладання використано такі методи: регресійний аналіз результатів однофакторних експериментів та інших парних залежностей, комп'ютерне моделювання.

### Результати досліджень

У таблиці 1 показана зміна маси залишкової частини ТПВ на 1 кг під час біорозкладання [25]. На основі даних таблиці 1 планувалось отримати парну регресійну залежність маси залишкової частини ТПВ на 1 кг від тривалості біорозкладання.

Таблиця 1

**Зміна маси залишкової частини ТПВ на 1 кг під час біорозкладання [25]**

Тривалість біорозкладання, діб	1	7	14	21	28	35	42	49	56	63
Маса залишкової частини ТПВ на 1 кг, г	1000	1000	937	893	869	863	784	779	751	730

Регресія проводилась на основі лінеаризувальних перетворень, що 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, і детально описана в роботі [26].

Програма "RegAnaliz" дозволяє проводити регресійний аналіз результатів однофакторних експериментів та інших парних залежностей із вибором кращого виду функції із 16 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:

$$m_{ТПВ} = \frac{1}{9,769 \cdot 10^{-4} + 6,293 \cdot 10^{-6}t} \text{ [г]}, \quad (1)$$

де  $m_{ТПВ}$  – маса залишкової частини ТПВ на 1 кг, г;  $t$  – тривалість біорозкладання, діб.

Таблиця 2

**Результати регресійного аналізу зміни маси залишкової частини ТПВ на 1 кг від тривалості біорозкладання**

№	Вид регресії	Коефіцієнт кореляції R	№	Вид регресії	Коефіцієнт кореляції R
1	$y = a + bx$	0,98620	9	$y = ax^b$	0,85913
2	$y = 1 / (a + bx)$	0,98902	10	$y = a + b \cdot \lg x$	0,87327
3	$y = a + b / x$	0,58936	11	$y = a + b \cdot \ln x$	0,87327
4	$y = x / (a + bx)$	0,99667	12	$y = a / (b + x)$	0,98901
5	$y = ab^x$	0,98854	13	$y = ax / (b + x)$	0,55135
6	$y = ae^{bx}$	0,98854	14	$y = ae^{b/x}$	0,57063
7	$y = a \cdot 10^{bx}$	0,98854	15	$y = a \cdot 10^{b/x}$	0,57063
8	$y = 1 / (a + be^{-x})$	0,46267	16	$y = a + bx^n$	0,93269

На рис. 1 показані фактична та теоретична графічна залежності маси залишкової частини ТПВ на 1 кг від тривалості біорозкладання.

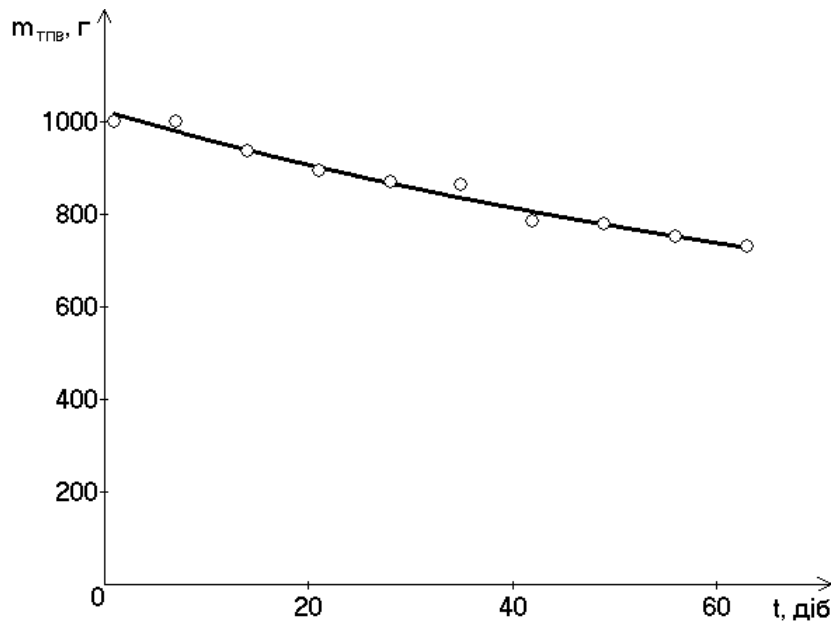


Рис. 1. Зміна маси залишкової частини ТПВ на 1 кг під час біорозкладання

Порівняння фактичних та теоретичних даних показало, що теоретична залежність маси залишкової частини ТПВ на 1 кг від тривалості біорозкладання, розрахована за допомогою рівняння регресії (1), несуттєво відрізняється від даних, наведених в роботі [25], що підтверджує визначену раніше достатню точність отриманої залежності.

З рівняння регресії (1) можна спрогнозувати тривалість біорозкладання, наприклад до зменшення маси ТПВ в двічі (до 500 г на 1 кг)

$$t = \frac{158907}{m_{ТПВ}} - 155,2 = \frac{158907}{500} - 155,2 \approx 163 \text{ (доби)}.$$

**Висновки**

1. Визначено регресійну гіперболічну залежність маси залишкової частини твердих побутових відходів на 1 кг від тривалості біорозкладання, яку використано для Наукові праці ВНТУ, 2021, № 1

прогнозування тривалість біорозкладання ТПВ до певного залишкової маси, і яка може бути використана для визначення раціональної періодичності проведення рекультиваційних заходів на полігоні їхнього захоронення.

2. Побудовано графічну інтерпретацію динаміки залишкової частини твердих побутових відходів на 1 кг від тривалості біорозкладання, яка дозволяє наочно проілюструвати цю залежність та показати достатню збіжність теоретичних результатів із фактичними.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Hamer G. Solid waste treatment and disposal : effects on public health and environmental safety / G. Hamer // *Biotechnology advances*. – 2003. – Vol. 22, № 1 – 2. – P. 71 – 79. – <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2003.08.007>.
2. Лемешев М. С. Ресурсозберігаюча технологія виробництва будівельних матеріалів з використанням техногенних відходів / М. С. Лемешев, О. В. Христин, С. Ю. Зузяк // *Сучасні технології, матеріали і конструкції у будівництві: науково-технічний збірник*. – 2018. – № 1. – С. 18 – 23.
3. Ковальський В. П. Використання золи виносу ТЕС у будівельних матеріалах / В. П. Ковальський, О. С. Сідлак // *Сучасні технології, матеріали і конструкції у будівництві: науково-технічний збірник*. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2014. – № 1 (16). – С. 35 – 40.
4. Мороз О. В. Економічні аспекти вирішення екологічних проблем утилізації твердих побутових відходів : монографія / О. В. Мороз, А. О. Свентух, О. Т. Свентух. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. – 110 с.
5. Березюк О. В. Моделювання динаміки санітарно-бактеріологічного складу твердих побутових відходів під час літнього компостування / О. В. Березюк, С. М. Горбатюк, Л. Л. Березюк // *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. – 2013. – № 4. – С. 17 – 20.
6. Піскун Р. П. Функціональна морфологія головного мозку при атеросклерозі в експерименті та під впливом вінпоцетину / Р. П. Піскун, С. М. Горбатюк // *Таврический медико-биологический вестник*. – 2006. – Т. 9, № 3. – С. 100 – 113.
7. Ратушняк Г. С. Енергозбереження в системах біоконверсії : навчальний посібник / Г. С. Ратушняк, В. В. Джеджула. – Вінниця: ВНТУ, 2006. – 83 с.
8. Воронкова Т. В. Система управління образованием фильтрата полигонов ТБО / Т. В. Воронкова, С. Ю. Чудинов // *Твердые бытовые отходы*. – 2013. – № 8. – С. 36 – 40.
9. Попович В. В. Екологічна небезпека фільтрату сміттєзвалищ / В. В. Попович // *Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції «Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи»*, 4-6 листопада 2015 р. – Львів, 2015. – С. 165 – 166.
10. Berezyuk O. Approximated mathematical model of hydraulic drive of container upturning during loading of solid domestic wastes into a dustcart / O. Berezyuk, V. Savulyak // *Technical Sciences*. – 2017. – № 20 (3). – P. 259 - 273.
11. Berezyuk O. V. Dynamics of hydraulic drive of hanging sweeping equipment of dust-cart with extended functional possibilities / O. V. Berezyuk, V. I. Savulyak // *TEHNOMUS – New Technologies and Products in Machine Manufacturing Technologies*. – Suceava, Romania, 2015. – № 22. – P. 345 – 351.
12. Мислюк Є. В. До питання про утилізацію твердих побутових відходів / Є. В. Мислюк, О. О. Мислюк // *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. – 2008. – № 3. – С. 177 – 182.
13. Гринчишин Н. М. Вплив важких металів на мікробіоценоз дерново-слабопідзолистого ґрунту / Н. М. Гринчишин, Т. М. Лозовицька // *Науковий вісник ЛНУВМБТ імені С. З. Гжицького*. – Т. 11, № 2 (41), Ч. 4, 2009. – С. 54 – 57.
14. Бойко В. В. Проблеми та перспективи поводження з твердими побутовими відходами / В. В. Бойко, Я. В. Калашник // *Сучасні технології в промисловому виробництві : матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій, Суми, 18-22 квітня 2011 року*. – Суми : СумДУ, 2011. – Ч. 3. – С. 97 – 98.
15. Кабінет Міністрів України. Постанова № 265 “Про затвердження Програми поводження з твердими побутовими відходами” [Електронний ресурс] 4 березня 2004. Режим доступу : <http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/265-2004-%D0%BF>.
16. Березюк О. В. Математичне моделювання прогнозування об’ємів утворення твердих побутових відходів та площ полігонів і сміттєзвалищ в Україні / О. В. Березюк // *Сучасні технології, матеріали і конструкції у будівництві: Науково-технічний збірник*. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – № 2. – С. 88 – 91.
17. Савуляк В. І. Технічне забезпечення збирання, перевезення та підготовки до переробки твердих побутових відходів : монографія / В. І. Савуляк, О. В. Березюк. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 217 с.
18. Попович В. В. Ефективність експлуатації сміттєвозів у середовищі "місто-сміттєзвалище" / В. В. Попович, О. В. Придатко, М. І. Сичевський // *Науковий вісник НЛТУ України*. – 2017. – Т. 27, № 10. – С. 111 – 116.
19. Microbial disinfection capacity of municipal solid waste (MSW) composting / I. Deportes, J.-L. Benoit-Guyod, D. Zmirou, M.-C. Bouvier // *Journal of Applied Microbiology*. – 1998. – № 85. – P. 238 – 246.

20. Impact Assessment of Contamination Pattern of Solid Waste Dumpsites Soil: A Comparative Study of Bauchi Metropolis / D. S. Buteh, I.Y. Chindo, E. O. Ekanem, E. M. Williams // World Journal of Analytical Chemistry. – 2013. – Vol. 1, № 4. – P. 59 – 62.
21. Березюк О. В. Моделювання питомих енерговитрат очищення ґрунтів полігонів твердих побутових відходів від забруднення важкими металами / О. В. Березюк // Комунальне господарство міст. Серія: безпека життєдіяльності людини – освіта, наука, практика. – 2015. – № 1 (120). – С. 240 – 242.
22. Регресійна залежність активності біологічних процесів у твердих побутових відходах від ступеня їхнього ущільнення з часом [Електронний ресурс] / О. В. Березюк, С. М. Горбатюк, Л. Л. Березюк // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2020. – № 2. – Режим доступу до журналу: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/600/568>.
23. Березюк О. В. Удосконалення математичної моделі концентрацій забруднювальних речовин у фільтраті полігонів твердих побутових відходів / О. В. Березюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 4. – С. 28 – 31.
24. Березюк О. В. Побудова моделей залежності концентрацій сапрофітних бактерій у ґрунті від відстані до полігону захоронення твердих побутових відходів / О. В. Березюк, Л. Л. Березюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2017. – № 1. – С. 36 – 39.
25. Тетеньова І. О. Гігієнічна оцінка сучасних технологій поводження з твердими побутовими відходами в Україні : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. мед. наук : спец. 14.02.01 “Гігієна та професійна патологія” / І. О. Тетеньова. – К., 2019. – 26 с.
26. 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 05.01.2021.

Стаття пройшла рецензування 18.01.2021.

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

Вінницький національний технічний університет.

**Горбатюк Світлана Михайлівна** – к. б. н., доцент, доцент кафедри медичної біології.

Вінницький національний медичний університет ім. М. І. Пирогова.

**Березюк Людмила Леонідівна** – секретар деканату машинобудування та транспорту.

Вінницький національний технічний університет.