

О. В. Березюк, к. т. н., доц.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ КОМПРЕСІЙНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ У СМІТТЄВОЗІ З УРАХУВАННЯМ ЇХНЬОЇ ВІДНОСНОЇ ВОЛОГОСТІ

Аналіз літературних джерел, присвячених поводженню з твердими побутовими відходами, підтвердив необхідність їхнього ущільнення. У статті наведено результати експериментального дослідження процесів ущільнення попередньо зневоднених і ущільнених твердих побутових відходів за допомогою планування експерименту методом Бокса – Уїлсона. Отримано адекватні регресійні моделі компресійних характеристик твердих побутових відходів у сміттєвозі з урахуванням їхньої відносної вологості. Адекватність регресійних моделей перевіряли за критерієм Фішера, а значущість коефіцієнтів регресії – за критерієм Стьюдента. Запропоновані математичні моделі можуть бути використані під час математичного моделювання ущільнення попередньо ущільнених і зневоднених твердих побутових відходів у сміттєвозі, а також створення методики інженерних розрахунків параметрів машин і механізмів для ущільнення як складника науково-технічних основ проектування високоефективних робочих органів машин для збирання та первинної переробки твердих побутових відходів. Побудовано поверхні відгуків цільових функцій: тиску пресування, густини та відносної вологості остаточно ущільнених і зневоднених твердих побутових відходів та їхні двомірні перерізи в площинах параметрів впливу, що дозволяють наочно проілюструвати залежність описаних цільових функцій від окремих параметрів впливу.

Ключові слова: *тверді побутові відходи, сміттєвоз, компресійна характеристика, тиск пресування, відносна деформація, густина, відносна вологість.*

Вступ

Тверді побутові відходи (ТПВ) загрожують здоров'ю людей та безпеці навколишнього середовища [1, 2]. Щороку в населених пунктах України утворюється понад 54 млн. м³ ТПВ. На відміну від твердих промислових відходів [3, 4], основну частину вітчизняних ТПВ захоронюють на 4530 полігонах і сміттєзвалищах площею майже 7700 га та лише частково переробляють або утилізують на сміттєспалювальних заводах, порівняно з високорозвинутими країнами, які відомі широким упровадженням сучасних технологій утилізації та переробки ТПВ [5]. Для зниження темпів зростання площ полігонів під час завантаження у сміттєвоз виконують технологічну операцію ущільнення ТПВ. Високий коефіцієнт ущільнення ТПВ сприяє ефективнішому використанню площі полігону. Перевезення ТПВ сміттєвозами до місця утилізації за мінімальної відстані 30 км, що відповідає розмірам санітарної зони, в Україні пов'язане зі значними фінансовими витратами, оскільки щорічно витрачають понад 45 тис. т пального. Зношеність автопарку сміттєвозів комунальних підприємств України сягає майже 70 % [6].

Постановка проблеми

Серед пріоритетних напрямів поводження з ТПВ в Україні є забезпечення застосування сучасних високоефективних сміттєвозів відповідно до постанови Кабінету Міністрів України № 265 [7]. Одним із перспективних напрямків підвищення ефективності сміттєвозів є підвищення коефіцієнта ущільнення ТПВ, тому побудова математичних моделей компресійних характеристик твердих побутових відходів у сміттєвозі з урахуванням їхньої відносної вологості є актуальною науково-технічною задачею, що є одним зі складників

розв'язання проблеми створення науково-технічних основ проектування високоефективних робочих органів машин для збирання та первинної переробки твердих побутових відходів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У роботі [8] запропоновано однофакторну регресійну залежність коефіцієнта ущільнення ТПВ від висоти полігона. У статті [9] наведено основні характеристики ТПВ, серед яких і їхня компресійна характеристика без урахування початкової відносної вологості відходів. У роботі [10] встановлено необхідність зневоднення ТПВ під час завантаження в сміттєвоз для більшості розглянутих методів поводження з ними. У статті [11] у лабораторних умовах досліджено стисливість і міцність на зсув ТПВ. Випробування на ущільнення й сухе та несухе тривісне стиснення проводили у відновлених зразках відходів великих розмірів і з різною питомою вагою насичених зразків і зразків, випробуваних за природного вмісту вологи. У роботі [12] визначено залежність між тиском пресування ТПВ та параметрами процесу: відносною деформацією та насипною густиною без урахування початкової відносної вологості ТПВ. У статті [13] досліджено вплив відносної вологості ТПВ на процес їхнього пресування. Визначено оптимальний вміст вологи під час пресування ТПВ – 10...12 %. Більш високий вміст вологи в брикеті призводив до підвищення тривалості процесу пресування, утворення нижчої густини брикету у внутрішньому шарі, нижчої міцності брикету, можливості появи розшарувань і здуття. Перевагами низького вологовмісту є: відсутність прилипання частинок ТПВ до стінок матриці та більш однорідний розподіл густини по товщині брикету. У роботі [14] визначено залежності густини ТПВ від вмісту вологи, сумісного зусилля й сезонних ефектів під час ущільнення в лабораторних і польових умовах, а також проаналізовано механізми ущільнення відходів. Тривалість гідратації ТПВ 16...24 год призвела до більш рівномірних кривих ущільнення, ніж для відходів, ущільнених без гідратації. У статті [15] розглянуто можливість утилізації ТПВ на наявних комунальних ТЕЦ із 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. У роботі [16] визначено, що вміст вологи й тиск ущільнення горючих компонентів ТПВ були двома основними параметрами для отримання якісних паливних брикетів, які мають теплотворну здатність не менше за 20 МДж/кг, еквівалентну теплотворній здатності бурого вугілля, і можуть бути спалені разом із вугіллям на електростанціях. Після досліджень, які проводили за кімнатної температури без використання в'язучого за тиску 69...138 МПа і відносній вологості ТПВ 6...20 %, установили, що вміст вологи не повинен перевищувати 15 % для отримання високоякісних брикетів із суміші паперу та інших горючих матеріалів у ТПВ.

Отже, аналіз літературних джерел, присвячених поводженню з ТПВ, підтвердив необхідність їхнього ущільнення.

Мета і завдання статті

Метою цієї статті є побудова за результатами багатofакторного експериментального дослідження математичних моделей компресійних характеристик твердих побутових відходів у сміттєвозі з урахуванням їхньої відносної вологості.

Методи й матеріали

Для дослідження компресійних властивостей ТПВ використовували експериментальну установку у вигляді вертикального гвинтового преса з максимальним зусиллям 6 т, загальний вигляд якої зображено на рис. 1а. Для вимірювання відносної вологості ТПВ [17] використовували вологомір (див. рис. 1б) з точністю вимірювання $\pm 0,5\%$, детально

описаний в роботі [18]. Визначення густини ТПВ здійснювали зважуванням за допомогою цифрових ваг Mirra SKE3250 (див. рис. 1в) з точністю вимірювання ± 1 г певного об'єму відходів.

Тиск пресування ТПВ p_e визначали за формулою [19]

$$p_e = F/S, \quad (1)$$

де F – зусилля пресування, Н; S – площа плити пресування, m^2 .

Відносну деформацію ТПВ ε визначали за виразом

$$\varepsilon = \Delta h/h = Nt/h, \quad (2)$$

де Δh – абсолютна деформація ТПВ, мм; h – висота бункера з ТПВ, мм; N – кількість обертів гвинта преса, шт.; t – крок гвинта, мм.

Для визначення коефіцієнтів багатофакторних регресійних залежностей використовували оригінальну комп'ютерну програму "PlanExp", захищену свідоцтвом про реєстрацію авторського права на твір [20] і детально описану в роботі [12].

Регресійні моделі перевіряли на адекватність за F-критерієм Фішера, а значущість коефіцієнтів регресії перевіряли за t-критерієм Стьюдента [21, 22].

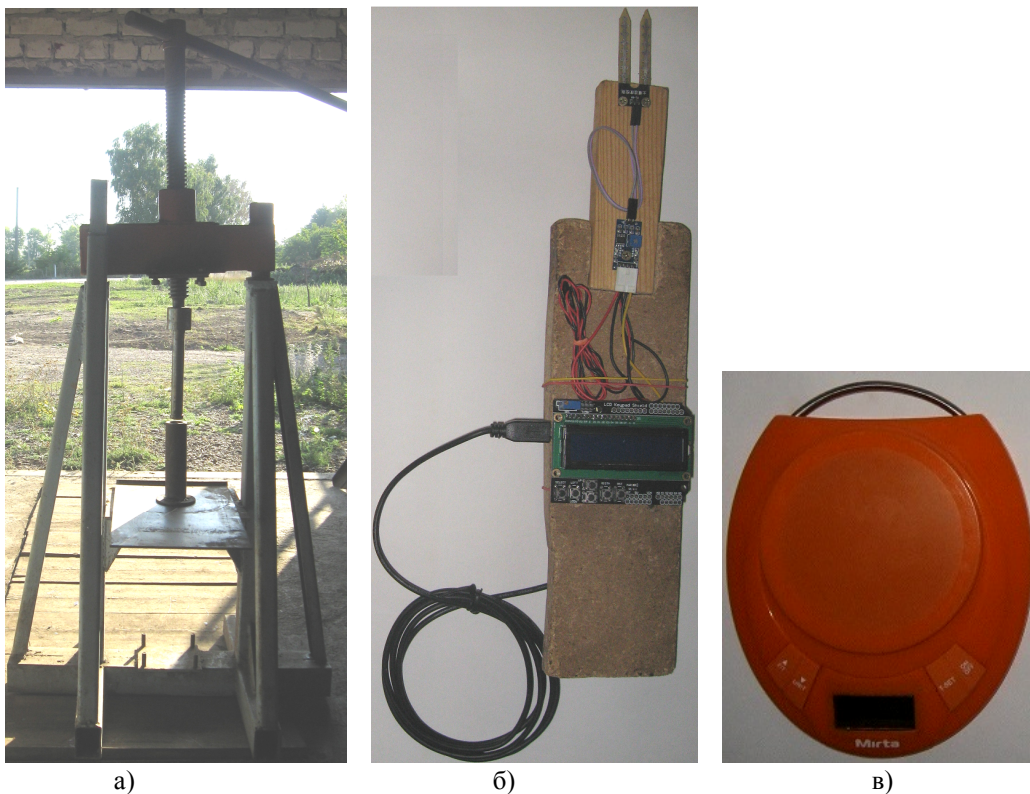


Рис. 1. Експериментальна установка для дослідження компресійних властивостей ТПВ: а) загальний вигляд, б) вологомір, в) ваги

Попередні експерименти засвідчили, що залежність тиску пресування ТПВ p_e від відносної деформації ε , густини ρ_1 та відносної вологості w_1 попередньо ущільнених та зневоднених ТПВ не може бути адекватно описана ні лінійною, ні квадратичною регресійною моделлю, тому було прийнято рішення про визначення регресійної моделі від чинників впливу в експоненціальній формі. Правильність вибору експоненціальної форми залежності $p_e = f(\varepsilon)$ підтверджено тим, що в роботі [23] зворотна залежність $\varepsilon = f(p_e)$ є логарифмічною. Значення коефіцієнтів отримано в результаті попередніх пошукових експериментів. Отже, види математичних моделей компресійних характеристик ТПВ у сміттєвозі виглядають так:

$$p_e = f(e^{6,094\varepsilon}, e^{-0,07908\rho_1}, e^{1,658w_1}), \quad (3)$$

$$\rho_2, w_2 = f(p_e, \rho_1, w_1), \quad (4)$$

де p_e – тиск пресування ТПВ, МПа; ε – відносна деформація ТПВ; ρ_1 – густина попередньо ущільнених і зневоднених ТПВ, кг/м³; w_1 – відносна вологість попередньо ущільнених і зневоднених ТПВ, %; ρ_2 – густина остаточно ущільнених і зневоднених ТПВ, кг/м³; w_2 – відносна вологість остаточно ущільнених і зневоднених ТПВ, %.

Кількість повторних дослідів у центрі плану експерименту визначали за рекомендаціями [24, 25].

Під час проведення дослідження значення відносної деформації ТПВ змінювались у межах $\varepsilon = 0,05 \dots 0,975$, максимального тиску пресування ТПВ – у межах $p_e = 4,187 \dots 26,515$ МПа, а діапазони значень двох інших чинників зумовлені результатами експерименту з попереднього ущільнення та зневоднення ТПВ [17]: $\rho_1 = 384,6 \dots 665,3$ кг/м³; $w_1 = 15,5 \dots 42,54$ %. Вибір діапазонів варіювання факторів функцій (3), (4) супроводжувала перевірка, щоб будь-яка їхня сукупність у передбачених планом експерименту діапазонах могла бути реалізована й не призводила до суперечностей. Для цього було проведено пошукові експерименти для визначення області, у якій необхідні сполучення рівнів факторів були б стійко реалізовані.

Результати експериментальних досліджень

Використовуючи планування експерименту за допомогою ротатабельного центрального композиційного планування другого порядку, застосовуючи розроблене програмне забезпечення, захищене свідоцтвом на твір [20] і детально описане в роботі [12], після відкидання за критерієм Стюдента незначущих факторів та ефектів взаємодій, отримали такі регресійні залежності:

$$p_e = 1,356 + 0,04669e^{6,094\varepsilon} - 1,162 \cdot 10^{13} e^{-0,07908\rho_1} - 1,267 \cdot 10^{-31} e^{1,658w_1} - 5,198 \cdot 10^{11} e^{6,094\varepsilon} e^{-0,07908\rho_1} \text{ [МПа];} \quad (5)$$

$$\rho_2 = 1964p_e + 211,4\rho_1 + 31,65w_1 - 9,276p_e\rho_1 + 81,15p_e^2 - 0,06183\rho_1^2 - 67226 \text{ [кг/м}^3\text{];} \quad (6)$$

$$w_2 = 8,906p_e - 0,2711\rho_1 + 4,074w_1 - 0,02712p_e\rho_1 - 6,93 \cdot 10^{-3} p_e w_1 + 0,1564p_e^2 + 8,758 \cdot 10^{-4} \rho_1^2 - 53,06 \text{ [%]}. \quad (7)$$

Перевірку адекватності регресійних моделей (5) – (7) проводили за критерієм Фішера.

Отримана регресійна залежність (5) може бути використана під час математичного моделювання ущільнення попередньо ущільнених і зневоднених ТПВ у сміттєвозі, а регресійні залежності (5) – (7) – для створення методики інженерних розрахунків параметрів машин і механізмів для ущільнення ТПВ. Зокрема регресійні залежності (6), (7) необхідні для визначення властивостей остаточно ущільнених і зневоднених ТПВ.

За критерієм Стюдента визначено, що серед досліджених чинників впливу найбільше на тиск пресування ТПВ впливає їхня відносна деформація, а найменше – відносна вологість попередньо ущільнених і зневоднених ТПВ.

На рис. 2 показано поверхні відгуків цільової функції: тиску пресування ТПВ p_e в площинах параметрів впливу, що дозволяють наочно проілюструвати вказану залежність.

За критерієм Стюдента визначено, що серед досліджених чинників впливу найбільше на густину остаточно ущільнених і зневоднених ТПВ впливає густина попередньо ущільнених і зневоднених ТПВ, а найменше – відносна вологість попередньо ущільнених і зневоднених

ТПВ.

На рис. 3 показано поверхні відгуків цільової функції густини остаточно ущільнених і зневоднених ТПВ ρ_2 у площинах параметрів впливу, що дозволяють наочно проілюструвати вказану залежність.

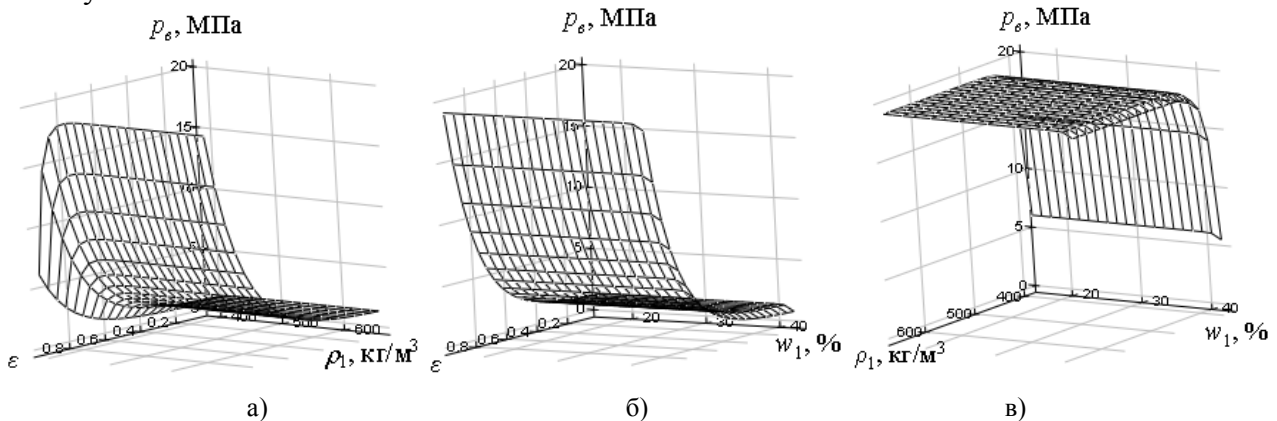


Рис. 2. Поверхні відгуків цільової функції тиску пресування ТПВ p_ϵ у площинах параметрів впливу:
 а) $p_\epsilon = f(\epsilon, \rho_1)$; б) $p_\epsilon = f(\rho_1, w_1)$; в) $p_\epsilon = f(\epsilon, w_1)$

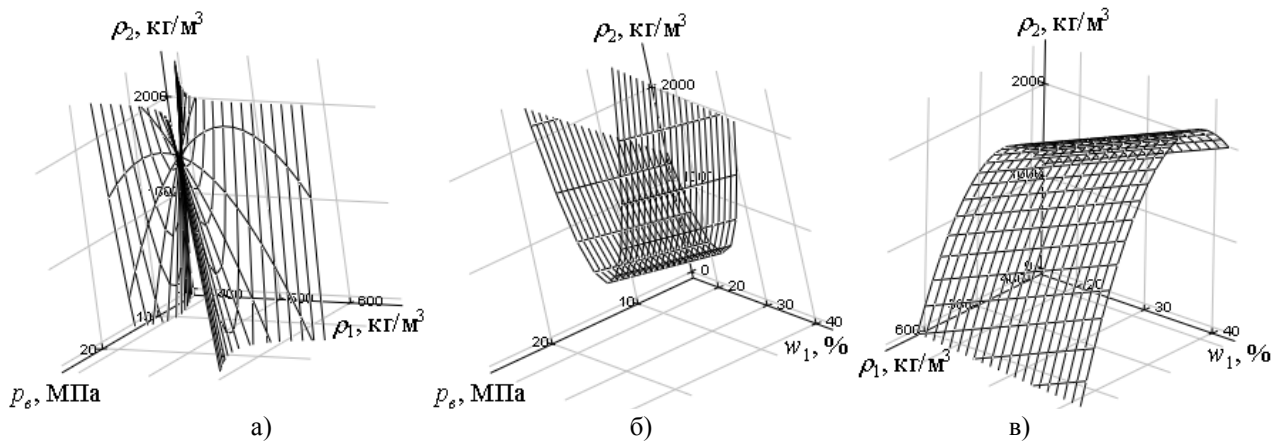


Рис. 3. Поверхні відгуків цільової функції густини остаточно ущільнених і зневоднених ТПВ ρ_2 у площинах параметрів впливу: а) $\rho_2 = f(p_\epsilon, \rho_1)$; б) $\rho_2 = f(p_\epsilon, w_1)$; в) $\rho_2 = f(\rho_1, w_1)$

За критерієм Стьюдента визначено, що серед досліджених чинників впливу найбільше на відносну вологість остаточно ущільнених і зневоднених ТПВ впливає тиск пресування ТПВ, а найменше – відносна вологість попередньо ущільнених і зневоднених ТПВ.

На рис. 4 показано поверхні відгуків цільової функції відносної вологості остаточно ущільнених і зневоднених ТПВ w_2 у площинах параметрів впливу, що дозволяють наглядно проілюструвати вказану залежність.

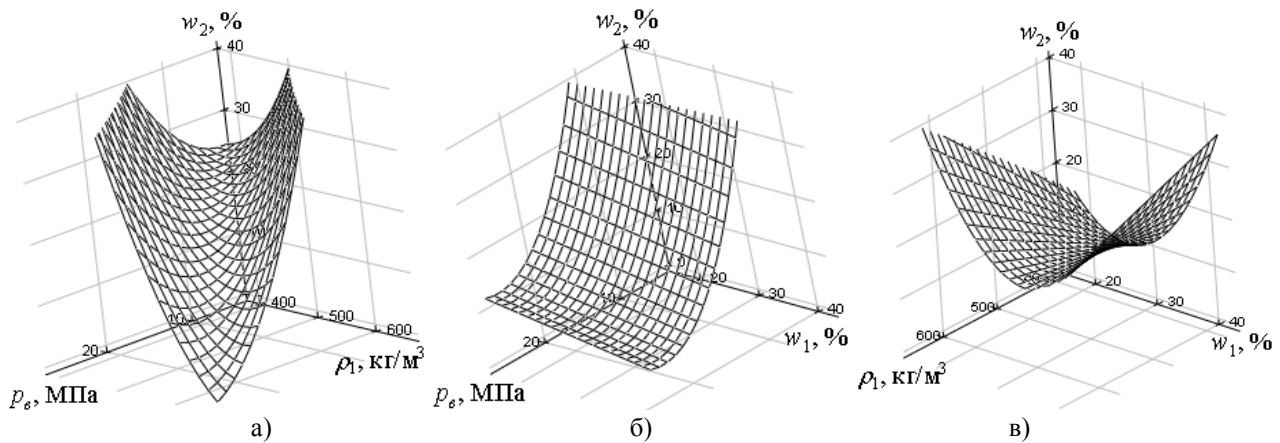


Рис. 4. Поверхні відгуків цільової функції відносної вологості остаточно ущільнених і зневоднених ТПВ w_2 у площинах параметрів впливу: а) $w_2 = f(p_e, \rho_1)$; б) $w_2 = f(p_e, w_1)$; в) $w_2 = f(\rho_1, w_1)$

Висновки

Аналіз літературних джерел, присвячених поводженню з твердими побутовими відходами, підтвердив необхідність їхнього ущільнення. Проведено експериментальне дослідження процесів ущільнення попередньо ущільнених і зневоднених твердих побутових відходів за допомогою планування експерименту, яке дозволило визначити адекватні регресійні моделі компресійних характеристик твердих побутових відходів у сміттєвозі з урахуванням їхньої відносної вологості, що можуть бути використані під час математичного моделювання ущільнення попередньо ущільнених і зневоднених ТПВ у сміттєвозі, а також створення науково-технічних основ проектування вискоєфективних робочих органів машин для збирання та первинної переробки твердих побутових відходів. За критерієм Стьюдента визначено, що серед досліджених чинників впливу найбільше на тиск пресування твердих побутових відходів впливає їхня відносна деформація, а найменше – відносна вологість попередньо ущільнених і зневоднених твердих побутових відходів; найбільше на густину остаточно ущільнених і зневоднених ТПВ впливає густина попередньо ущільнених і зневоднених ТПВ, а найменше – відносна вологість попередньо ущільнених і зневоднених ТПВ; найбільше на відносну вологість остаточно ущільнених і зневоднених ТПВ впливає тиск пресування ТПВ, а найменше – відносна вологість попередньо ущільнених і зневоднених ТПВ. Побудовано поверхні відгуків цільових функцій – тиску пресування, густини та відносної вологості остаточно ущільнених і зневоднених твердих побутових відходів та їхні двомірні перерізи в площинах параметрів впливу, що дозволяють наочно проілюструвати залежність описаних цільових функцій від окремих параметрів впливу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Buteh D. S. 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.
2. 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. – DOI :10.1016/j.biotechadv.2003.08.007.
3. Ковальський В. П. Передумови активації золи-винесення відходами глиноземного виробництва / В. П. Ковальський // *Матеріали VIII міжнародної науково-практичної конференції “Наука і освіта”*. – 2005. – С. 31 – 32.
4. Лемешев М. С. Ресурсозберігаюча технологія виробництва будівельних матеріалів з використанням техногенних відходів / М. С. Лемешев, О. В. Христинич, С. Ю. Зузяк // *Сучасні технології, матеріали і конструкції у будівництві*. – 2018. – № 1. – С. 18 – 23.
5. 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.

6. Ефективність експлуатації сміттєвозів у середовищі "місто-сміттєзвалище" / В. В. Попович, О. В. Придатко, М. І. Сичевський [та ін.] // Науковий вісник НЛТУ України. – 2017. – Т. 27, № 10. – С. 111 – 116.
7. Постанова № 265 "Про затвердження Програми поводження з твердими побутовими відходами" [Електронний ресурс] 4 березня 2004. / Кабінет Міністрів України. – Режим доступу: <http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/265-2004-%D0%BF>.
8. 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.
9. Характеристика твердых бытовых отходов [Електронний ресурс] / А. Ю. Масленников // Отраслевой портал. Вторичное сырье. 23 июня 2019. Режим доступа : <http://www.recyclers.ru/modules/section/item.php?itemid=143>.
10. Формування вимог до вологості твердих побутових відходів під час завантаження у сміттєвоз [Електронний ресурс] / О. В. Березюк // Матеріали XLVIII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 13-15 березня 2019 р. – Режим доступу : <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/all-fmt-2019/paper/view/6783>.
11. Vilar O. M. Mechanical properties of municipal solid waste / O. M. Vilar, M. F. Carvalhod // Journal of Testing and Evaluation. – 2004. – Vol. 32, №. 6. – P. 438 – 449. – DOI : 10.1520/JTE11945.
12. Березюк О. В. Моделювання компресійної характеристики твердих побутових відходів у сміттєвозі на основі комп'ютерної програми "PlanExp" / О. В. Березюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 6. – С. 23 – 28.
13. Гонопольский А. М. Влияние влажности на процесс прессования ТБО со связующим веществом / А. М. Гонопольский, Л. С. Ермакова, И. А. Патрикеев // Естественные и математические науки в современном мире. – 2014. – № 19. – С. 82 – 84.
14. Compaction characteristics of municipal solid waste / J. L. Hanson, N. Yesiller, S. A. Von Stockhausen, W. W. Wong // Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering. – 2010. – Vol. 136, №. 8. – P. 1095 – 1102. – DOI : 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000324.
15. Рижий В. К. Утилізація твердих побутових відходів на наявних комунальних ТЕЦ / В. К. Рижий, Т. І. Римар, І. Л. Тимофеев // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2011. – № 712 : Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація. – С. 17 – 22.
16. Li Y. High-pressure compaction of municipal solid waste to form densified fuel / Y. Li, H. Liu, O. Zhang // Fuel Processing Technology. – 2001. – Vol. 74, №. 2. – P. 81 – 91. – DOI : 10.1016/S0378-3820(01)00218-1.
17. Березюк О. В. Експериментальне дослідження процесів зневоднення твердих побутових відходів шнековим пресом / О. В. Березюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2018. – № 5. – С. 18 – 24. – DOI : 10.31649/1997-9266-2018-140-5-18-24.
18. Means for measuring relative humidity of municipal solid wastes based on the microcontroller Arduino UNO R3 / O. V. Bereziuk, M. S. Lemeshev, V. V. Bohachuk, M. Duk // Proceedings of SPIE, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2018. – 2018. – Vol. 10808, №. 108083G. – DOI : 10.1117/12.2501557.
19. Машиностроительный гидропривод / [Л. А. Кондаков, Г. А. Никитин, В. Н. Прокофьев и др.]. – М. : Машиностроение, 1978. – 495 с.
20. Березюк О. В. Комп'ютерна програма "Планування експерименту" ("PlanExp") / Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 46876 // власник свідоцтва О. В. Березюк. – К. : Державна служба інтелектуальної власності України. – Дата реєстрації: 21.12.2012.
21. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М. : Наука, 1976. – 280 с.
22. Методы исследований и организация экспериментов / [под ред. проф. К. П. Власова]. – Х. : Гуманитарный центр, 2002. – 256 с.
23. Oweis I. S. Criteria for geotechnical construction on sanitary landfills / I. S. Oweis, R. Khera // International Symposium on Environmental Geotechnology. – USA : NVO Publishing Company Inc., 1986. – Vol. 1. – P. 205 – 222.
24. Новицкий П. В. Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – Л. : Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.
25. Левшина Е. С. Электрические измерения физических величин : (Измерительные преобразователи) / Е. С. Левшина, П. В. Новицкий. – Л. : Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.

Стаття надійшла до редакції 10.10.2019 р.

Стаття пройшла рецензування 22.10.2019 р.

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

Вінницький національний технічний університет.