

Т. В. Гребенюк, канд. техн. наук, доц; ORCID 0000-0002-9287-2919  
О. Я. Тверда, д-р. техн. наук, доц; ORCID 0000-0003-3163-0972  
М. В. Репін, канд. техн. наук; ORCID 0000-0002-0318-8278  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО ПОКАЗНИКА ВОЛОГОСТІ ПРИ СПАЛЮВАННІ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

*В статті розглянуто актуальне для сьогодення питання поводження з твердими побутовими відходами та акцентовано увагу на те, що найбільш ефективним методом скорочення обсягу відходів є термічна обробка. Приділено увагу такому важливому параметру при спалюванні твердих побутових відходів як вологість та наведено дані типової вологості. Проведено огляд впливів забруднюючих речовин, що виділяються в процесі спалювання побутових відходів. Проведено аналіз концентрації основних хімічних сполук при спалюванні твердих побутових відходів в залежності від ступеня їх вологості. Розраховано показник прийнятної вологості для спалювання відходів, при якому кількість викидів буде мінімальною. Для спрощення розрахунку застосовувались програмні забезпечення Microsoft Excel та MathCad. При визначенні використовувались реальні значення вологості та концентрації викидів. Шляхом перетворень, співвідношень та розрахунків встановлено залежності для кожного з викидів. Використовуючи коефіцієнти, які враховують клас небезпеки речовин та додавши всі значення було знайдено мінімальне значення викидів та вологість, при якій спостерігається це значення. Створено алгоритм розрахунку, за яким можна визначити кількість викидів, що утвориться при спалюванні конкретної суміші твердих побутових відходів.*

**Ключові слова:** тверді побутові відходи, забруднюючі речовини, вологість, утилізація, викиди, хімічні сполуки.

### Вступ

Утилізація твердих відходів є гострою та поширеною проблемою як у міських, так і в сільських районах багатьох розвинених країн та країн, що розвиваються. Збір та захоронення твердих побутових відходів (ТПВ) є однією з головних проблем міського середовища в більшості країн світу сьогодні. Рішення щодо управління ТПВ повинні бути фінансово стійкими, технічно здійсненими, соціально, юридично прийнятними та екологічними. Поводження з твердими відходами – найбільший виклик для влади як малих, так і великих міст.

У свою чергу, саме енергетична утилізація ділиться на три основних типи:

1. Збір біогазу на полігонах і звалищах ТПВ з наступним виробництвом електро- та/або теплової енергії;
2. Механо-біологічна обробка ТПВ з можливим виробництвом біогазу та/або твердого палива з ТПВ з подальшим використанням на цементних заводах або в спеціалізованих ТЕЦ/котельнях;
3. Термічна обробка/переробка змішаних (залишків після сортування) ТПВ з подальшим виробництвом електроенергії та/або тепла

Термічна обробка ТПВ [1] є найбільш ефективним методом скорочення відходів і необхідності їх видалення. Можливі такі види утилізації побутових відходів:

- 1) виробництво тепла і електроенергії з RDF (Refuse Derived Fuel)/SRF(Solid Recovered Fuel), отриманого після механічної та біологічної обробки;
- 2) класична сміттеспалювальна установка – спалювання змішаних ТПВ після вилучення цінної сировини;
- 3) експериментальні технології: піроліз, газифікація.

Проте в процесі спалювання ТПВ в атмосферу виділяються забруднюючі речовини та хімічні сполуки, що залежать від багатьох факторів і здійснюють негативний вплив на довкілля.

### Мета та завдання.

Метою роботи є визначення показника прийнятної вологості для спалювання твердих побутових відходів, при якому кількість викидів буде мінімальною.

### Матеріал і результати досліджень.

При плануванні процесу спалювання суміші ТПВ враховується чимало параметрів: технологія, за якою буде утилізуватись сміття, морфологічний склад, необхідність попередньо підготовки (сортування, по-  
© Т.В. Гребенюк, О.Я. Тверда, М.В. Репін, 2019

дрібнення), агрегатний стан відходів, фракційний склад, теплота згорання відходів тощо. Не менш важливою характеристикою є і вологість відходів.

Волога – кількість води, що вбирається в матеріал у вигляді пари або рідини. Її можна виразити двома окремими способами, як відсоток від мокрої маси зразка або як відсоток від сухої маси зразка. Перший метод використовується частіше, і формула для його вираження:

$$M = \frac{w - d}{w} * 100\% \quad (1)$$

де M – вміст вологи, %;

w – вага свіжого зразка;

d – вага зразка після висихання.

Різні відходи мають різні характеристики, що стосуються вмісту вологи та питомої ваги [2]. Як видно з табл.1, типовий вміст вологи змінюється від 80% до 0% залежно від матеріалів.

Таблиця 1 – Дані щодо типової вологості у відходах

Тип відходів	Вологість, % маси	
	Діапазон	Типова
<b>Житлові відходи</b>		
Харчові відходи (змішані)	50-80	70
Папір	4-10	6
Картон	4-8	5
Пластик	1-4	2
Текстиль	8-15	10
Гума	1-4	2
Шкіра	8-12	10
Дворові відходи	30-80	60
Деревина	15-40	20
Скло	1-4	2
Жерстяні банки	2-4	3
Алюміній	2-4	2
Інші метали	2-4	3
Бруд, зола тощо	6-12	8
Попіл	6-12	6
Інше сміття	5-20	15
<b>Комерційні відходи</b>		
Харчові відходи	50-80	70
Прилади	0-2	1
Дерев'яні вироби	10-30	20
Обрізки з дерев	10-80	15
Сміття (горюче)	10-30	15
Сміття (негорюче)	5-15	10
Сміття (змішане)	10-25	15
<b>Будівництво та знесення</b>		
Змішане знесення (негорюче)	2-10	4
Змішане знесення (горюче)	4-15	8
Змішана конструкція (горюча)	4-15	8

Зазвичай муніципальні відходи містять більше вологи, ніж комерційні. Це відбувається тому, що харчові відходи змішуються з муніципальними відходами, тому вміст вологи може підвищуватися до 40%, а в комерційних відходах - до 30%.

Згідно [3] при різних кількостях вологи у суміші ТПВ під час спалювання у доквілля надходять забруднюючі речовини з різною концентрацією. Дані речовин та їх концентрацій наведено в табл.2.

Таблиця 2 – Концентрація основних хімічних сполук при спалюванні

Вологість ТПВ, %	Хімічні сполуки, мг/м <sup>3</sup>					
	HCL	NH <sub>3</sub>	HCN	H <sub>2</sub> S	SO <sub>2</sub>	CS <sub>2</sub>
34	2,5	0,05	0,73	16,3	0,3	0,75
17	3,0	0,01	0,85	14	0,3	1,7
5	6,5	0,006	1,0	7,9	0,4	2,4

Проведемо більш детальний аналіз кожної зі сполук. Дані речовини підлягають ефекту сумачії, тому можна визначити їх відсотковий склад та перевести значення концентрації в масові викиди (табл.3).

Таблиця 3 – Перераховані кількості забруднюючих речовин

Вологість ТПВ, %	Хімічні сполуки, мг/м <sup>3</sup>					
	HCL	NH <sub>3</sub>	HCN	H <sub>2</sub> S	SO <sub>2</sub>	CS <sub>2</sub>
34	0,359	0,0001399	0,028	12,88	0,0061	0,053
17	0,454	0,000008363	0,035	9,869	0,0051	0,143
5	2,307	0,000001145	0,042	3,428	0,0068	0,242

Далі графічно наводимо залежності кількості викидів від вологості спалюваної суміші (рис.1 – рис.6).

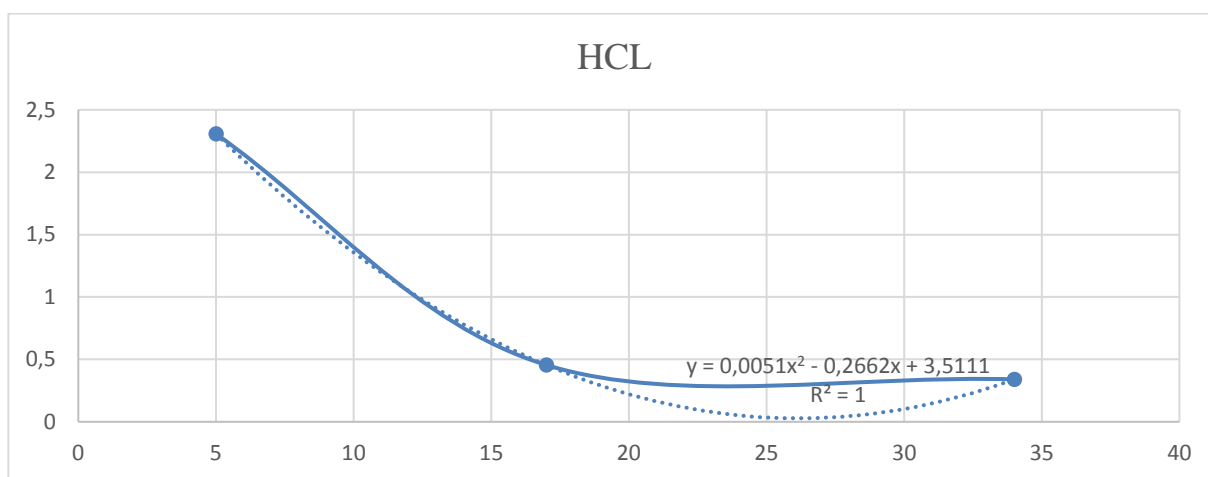


Рисунок 1 – Залежність кількості викидів від вологості спалюваної суміші для HCL

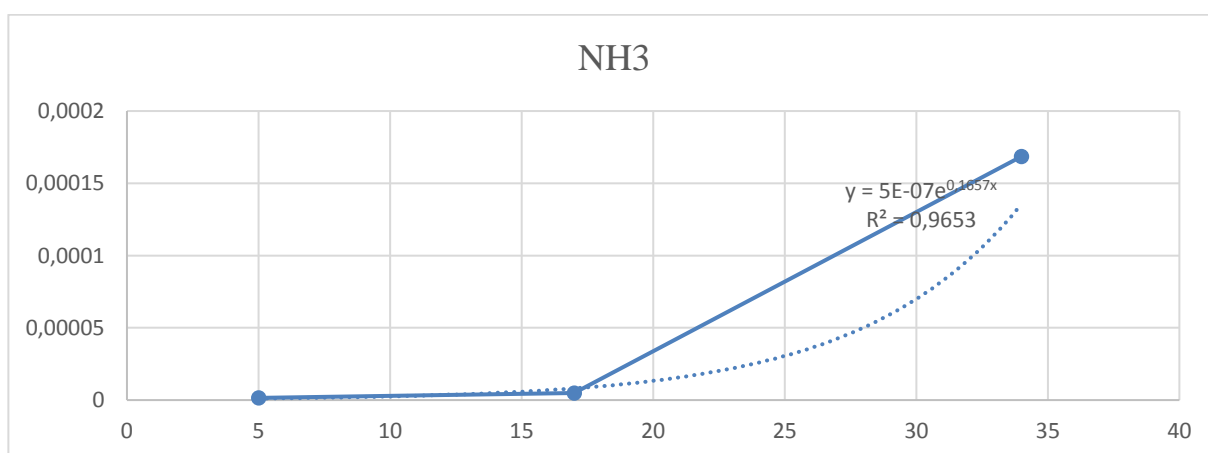


Рисунок 2 – Залежність кількості викидів від вологості спалюваної суміші для NH<sub>3</sub>

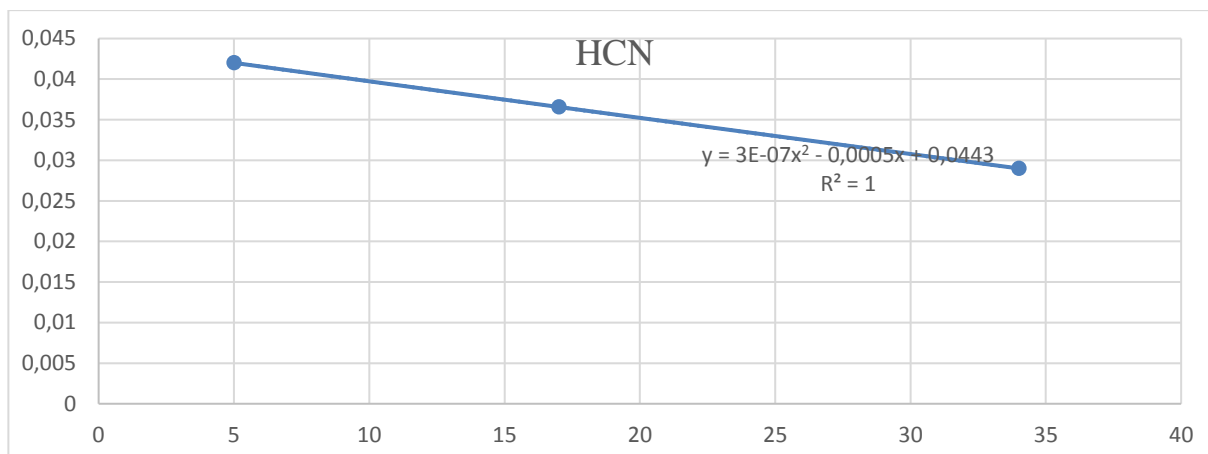


Рисунок 3 – Залежність кількості викидів від вологості спалюваної суміші для HCN

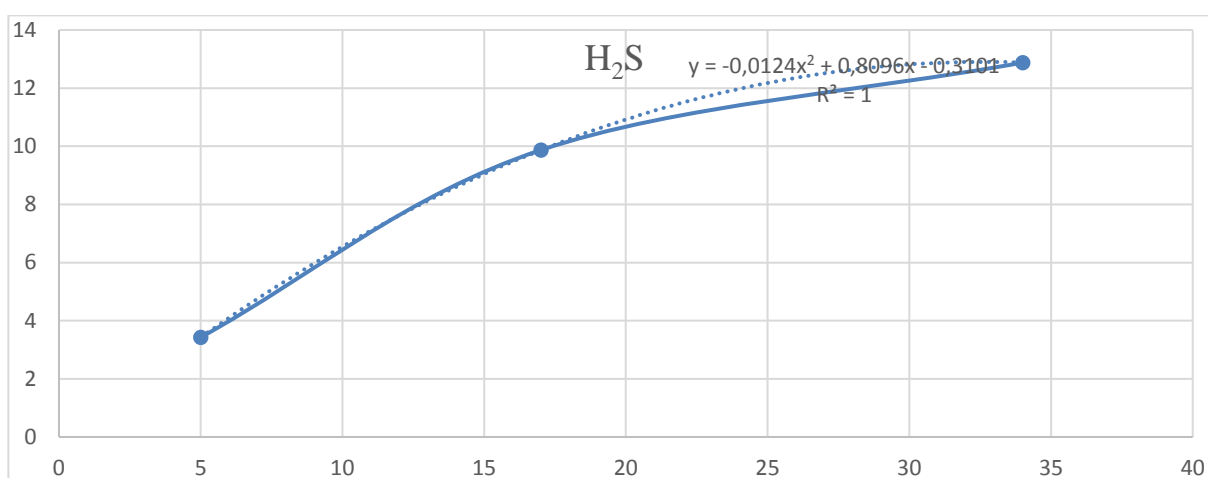


Рисунок 4 – Залежність кількості викидів від вологості спалюваної суміші для H<sub>2</sub>S

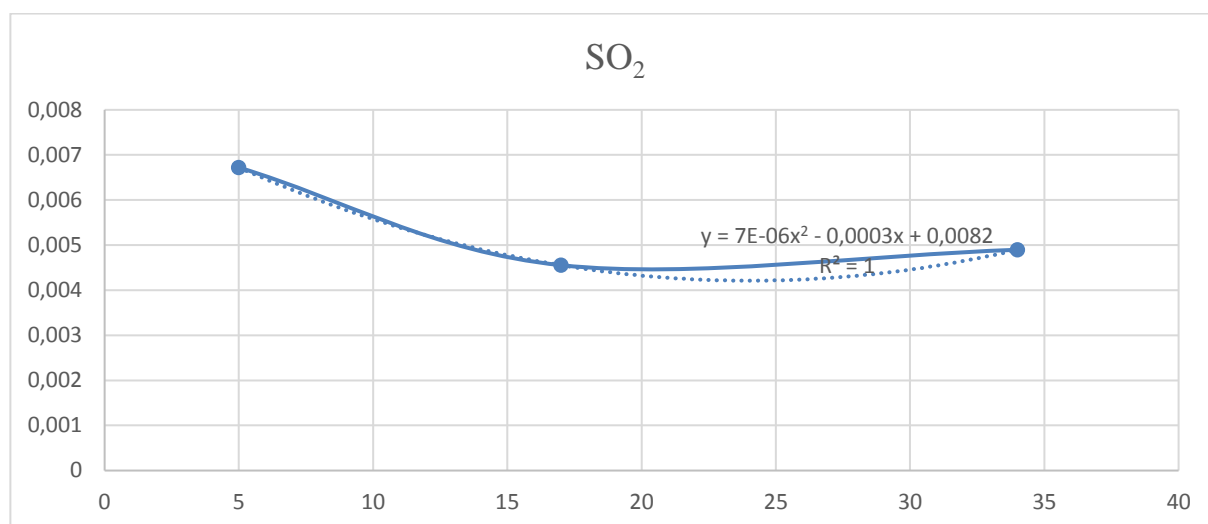


Рисунок 5 – Залежність кількості викидів від вологості спалюваної суміші для SO<sub>2</sub>

Згідно даних, у програмному середовищі MS Excel визначено лінію тренду для кожної із залежностей.

Лінія тренду використовується для прогнозування будь-якої події на основі уже наявних даних. За допомогою неї можна візуально зрозуміти, яку динаміку мають дані, з яких побудований графік. Маючи

лінії тренду для даних викидів можна розрахувати їх кількість при різних значеннях вологості. Для цього використовується програмне забезпечення MathCad [4].

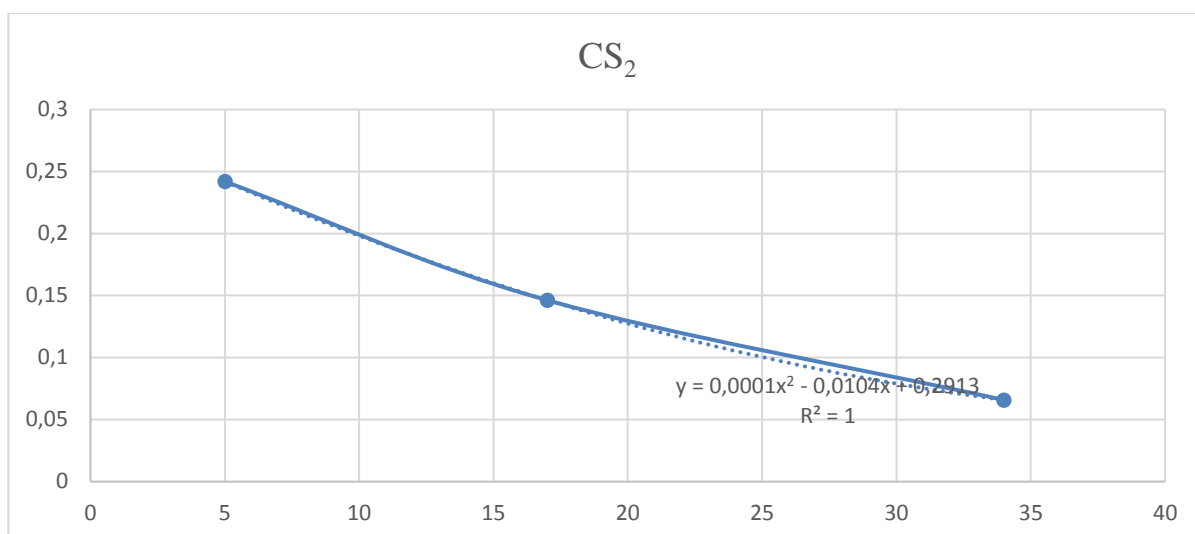


Рисунок 6 – Залежність кількості викидів від вологості спалюваної суміші для CS<sub>2</sub>

Значення вологості за якими розраховуватимуться кількість викидів:

$$x = (5; 10; 15; 20; 25; 30; 35; 40) \quad (2)$$

Тепер для кожного випадку записуємо формулу тренду, за якою розраховуватиметься кількість викидів.

*Кількість викидів HCL:*

$$y_1 = 0,0051x^2 - 0,2662x + 3,5111 = (2,308; 1,359; 0,666; 0,227; 0,044; 0,115; 0,442; 1,023) \quad (3)$$

Мінімальне значення викидів  $\min(y_1) = 0,044$  досягається при значенні температури  $x_5 = 25$ .

*Кількість викидів NH<sub>3</sub>:*

$$y_2 = 3 \cdot 10^{-7}x^2 - 5 \cdot 10^{-6}x + 2 \cdot 10^{-5} = (2,5 \cdot 10^{-6}; 0; 1,25 \cdot 10^{-5}; 4 \cdot 10^{-5}; 8,25 \cdot 10^{-5}; 1,4 \cdot 10^{-4}; 2,125 \cdot 10^{-4}; 3 \cdot 10^{-4}) \quad (4)$$

Мінімальне значення викидів  $\min(y_2) = 0$  досягається при значенні температури  $x_2 = 10$ .

*Кількість викидів HCN:*

$$y_3 = 3 \cdot 10^{-7}x^2 - 0,0005x + 0,0443 = (0,042; 0,039; 0,037; 0,034; 0,032; 0,03; 0,027; 1,025) \quad (5)$$

Мінімальне значення викидів  $\min(y_3) = 0$  досягається при значенні температури  $x_8 = 40$ .

*Кількість викидів H<sub>2</sub>S:*

$$y_4 = -0,0127x^2 + 0,7872x + 4,2607 = (7,879; 10,863; 13,211; 14,925; 16,003; 16,447; 16,255; 15,429) \quad (6)$$

Мінімальне значення викидів  $\min(y_4) = 7,879$  досягається при значенні температури  $x_1 = 5$ .

Кількість викидів  $SO_2$ :

$$y_5 = 7 \cdot 10^{-6}x^2 - 0,0003x + 0,0082 = (6,875 \cdot 10^{-3}; 5,9 \cdot 10^{-3}; 5,275 \cdot 10^{-3}; 5 \cdot 10^{-3}; 5,075 \cdot 10^{-3}; 5,5 \cdot 10^{-3}) \quad (7)$$

Мінімальне значення викидів  $\min(y_5) = 5 \cdot 10^{-3}$  досягається при значенні температури  $x_4 = 20$ .

Кількість викидів  $CS_2$ :

$$y_6 = 0,0001x^2 + 0,0104x + 0,2813 = (0,232; 0,187; 0,148; 0,113; 0,084; 0,059; 0,04; 0,025) \quad (8)$$

Мінімальне значення викидів  $\min(y_6) = 0,025$  досягається при значенні температури  $x_8 = 40$ .

Групи та класи небезпеки визначаються залежно від рівня впливу та рівня захисту, що запобігає цей вплив. Класи небезпеки визначаються за видами небезпеки.

Речовини, що надходять у довкілля при спалюванні відходів мають різний негативний вплив на довкілля, як результат – належать до різних класів небезпеки, їх класифікація наведена в табл. 4. [5]. Для подальших розрахунків речовинам надається коефіцієнт, який залежатиме від класу небезпечності речовини і показуватиме рівень впливу.

Таблиця 4 – Класи небезпеки речовин

Речовина	Клас небезпеки	Коефіцієнт
HCL	2	1,3
NH <sub>3</sub>	4	1,1
HCN	2	1,3
H <sub>2</sub> S	2	1,3
SO <sub>2</sub>	3	1,2
CS <sub>2</sub>	3	1,2

Згідно таблиці, наведеної вище розраховуємо загальну кількість викидів при даних температурах:

$$Y = 1,3 y_1 + 1,1 y_2 + 1,3 y_3 + 1,3 y_4 + 1,2 y_5 + 1,2 y_6 = (7,809; 10,571; 12,866; 14,692; 16,051; 16,941; 17,364; 17,318) \quad (9)$$

Мінімальне значення викидів  $\min(Y) = 7,809$  досягається при значенні температури  $x_1 = 5$ .

Таблиця 5 – Типи відходів для розрахунку викидів

№	Тип відходів	Вологість, % маси
1	Харчові відходи (змішані)	70
2	Папір	6
3	Картон	5
4	Пластик	2
5	Текстиль	10
6	Гума	2
7	Шкіра	10
8	Дворові відходи	60
9	Деревина	20
10	Скло	2
11	Жерстяні банки	3
12	Алюміній	2
13	Інші метали	3
14	Бруд, зола тощо	8
15	Попіл	6
16	Інше сміття	15

Для визначення вологості відповідної суміші потрібно занести дані щодо морфологічного складу відходів.

Оскільки спалювана суміш може бути утворена різними відсотковим та морфологічним складом, то був розроблений алгоритм, що дозволить розрахувати кількість викидів для конкретного морфологічного складу ТПВ. Для цього взято перелік груп побутових відходів та характеристики їх типової вологості (табл. 5).

$$I_1 = 10; I_2 = 10; I_3 = 5; I_4 = 5; I_5 = 5; I_6 = 5; I_7 = 5; I_8 = 5; \\ I_9 = 10; I_{10} = 5; I_{11} = 5; I_{12} = 5; I_{13} = 5; I_{14} = 5; I_{15} = 5; I_{16} = 5. \quad (10)$$

Вологість суміші (WW) визначається наступним чином:

$$WW = I \cdot W = 22,4 \quad (11)$$

де  $I = (I_1/100; I_2/100; I_3/100; I_4/100; I_5/100; I_6/100; I_7/100; I_8/100; I_9/100; I_{10}/100; I_{11}/100; I_{12}/100; I_{13}/100; I_{14}/100; I_{15}/100; I_{16}/100)$ ;

$W = (70; 6; 5; 2; 10; 2; 10; 60; 20; 2; 3; 2; 3; 8; 6; 15)$ .

Підставимо отримане значення в наявний діапазон значень:  $x = (5; 10; 15; 20; 22,4; 30; 35; 40)$

Далі розрахунки проводяться аналогічно попереднім і наприкінці отримуємо значення суми викидів при даній температурі. Розраховане значення вологості знаходиться на п'ятій позиції, тому відразу шукаємо значення викидів при п'ятому значенні (рис. 7).

$$Y = 1,3 y_1 + 1,1 y_2 + 1,3 y_3 + 1,3 y_4 + 1,2 y_5 + 1,2 y_6 = \\ = (7,809; 10,571; 12,866; 14,692; 15,403; 16,941; 17,364; 17,318) \quad (12)$$

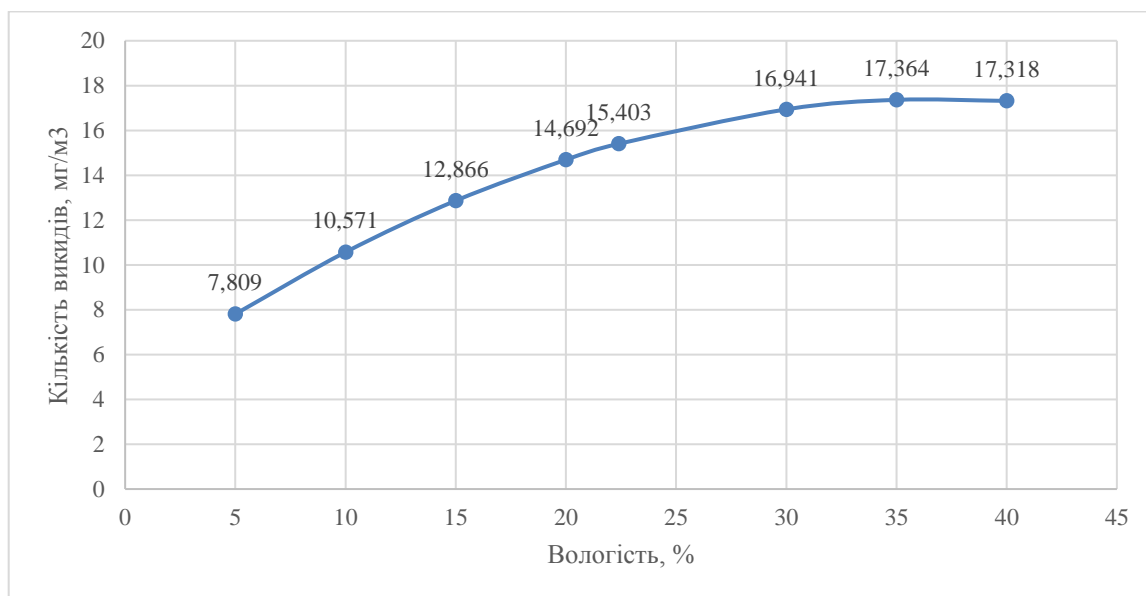


Рисунок 7 – Залежність викидів від вологості випадкової суміші

Таким чином, даний алгоритм можна застосовувати для будь якого складу ТПВ.

### Висновки

Досліджено типові вологості для різних груп відходів. Значення вологості може коливатись від 0 до 80% в залежності від типу сміття. Відходи від житлової галузі мають найбільшу ступінь вологості, оскільки там великий відсотковий склад органічний відходів. Встановлено залежності для кожного з викидів, наведено їх графічний вигляд. При зменшенні вологості під час процесу спалювання відходів, кількість викидів може зменшуватись або збільшуватись. Це пов'язано з ефективністю їх випалювання та характером викидів.

За допомогою існуючого програмного забезпечення для кожного викиду розраховано його кількість при заданих значеннях вологості суміші. Розраховано сумарне значення викидів при заданій вологості. Визначено оптимальне значення вологості для спалювання суміші – 5 %.

Розроблено алгоритм, за яким можна визначити сумарну кількість забруднюючих речовин що надходить у довкілля в процесі термічної утилізації відходів

#### **Список використаної літератури**

1. Гребенюк Т.В., Попач М.В. Аналіз методів термічної обробки твердих побутових відходів. *Актуальные научные исследования в современном мире*. 2019. №11. С. 92–97.
2. Kanfoud S., Kouloughli S. Municipal Solid Waste Management in Constantine, Algeria. *Journal of Geoscience and Environment Protection*. 2017. № 5. P. 25–31.
3. Круш П.В., Шевчук Н.А. Стартап-проект. Рекомендації до виконання розділу магістерської дисертації «Розроблення стартап-проекту». Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 50 с.
4. Кириянов, Дмитрий Самоучитель Mathcad 13 / Дмитрий Кириянов. - М.: БХВ-Петербург, 2006. - 761 с.
5. Трофімов І.Л., Яковлева А.В. Аналіз потенціалу твердих побутових відходів як сировини для виробництва альтернативних палив в Україні. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. Київ, 2016. С. 105–111.

**T. Hrebenuik**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof.; **ORCID** 0000-0002-9287-2919

**O. Tverda**, Dr. Eng. Sc., Assoc. Prof.; **ORCID** 0000-0003-3163-0972

**M. Repin**, Cand. Sc. (Eng.); **ORCID** 0000-0002-0318-8278

**National Technical University of Ukraine**

**“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”**

## **DEFINITIONS OF A RATIONAL INDICATOR OF HUMIDITY AT COMBUSTION OF MUNICIPAL SOLID WASTE**

*The article deals with the current issue of solid waste management for today and emphasizes that heat treatment is the most effective method of waste reduction. Under the heat treatment, the combustion process is considered. The impact of pollutants released during the incineration of household waste is reviewed. It is revealed that a number of certain parameters are taken into account while planning the process of incineration of a mixture of solid waste. Such as technology that will dispose of debris, morphological composition, the need for pre-treatment (sorting, grinding), the aggregate state of waste, fractional composition, heat of combustion of waste, etc. Equally important is the humidity of the waste to be recovered through incineration. Humidity is the amount of water absorbed into the material in the form of steam or liquid. It can be expressed in two separate ways, as a percentage of the wet weight of the sample or as a percentage of the dry weight of the sample. Therefore, this paper focuses on such an important parameter when burning solid waste as humidity, and presents typical humidity data. The analysis of the concentration of basic chemical compounds during the incineration of municipal solid waste, depending on the degree of their humidity was done. The acceptable waste incineration humidity is calculated, with minimum emissions. Microsoft Excel and MathCad software were used to simplify the calculation. Real values of humidity and emission concentration were used in the determination. The transformations, ratios and calculations determine the dependencies for each emission were established. Using the factors that take into account the hazard class of the substances and adding all the values, the minimum emission value and the humidity at which this value is observed were found. A calculation algorithm has been developed to determine the amount of emissions that will be generated by burning a specific mixture of solid waste.*

**Keywords:** *municipal solid waste, pollutants, humidity, recycling, emissions, chemical compounds.*

#### **References**

1. Hrebenuik T.V., Popach M.V. Analiz metodiv termichnoi obrobky tverdykh pobutovykh vidkhodiv. *Aktualnye nauchnye issledovaniya v sovremennom mire*. 2019. №11. S. 92–97.
2. Kanfoud S., Kouloughli S. Municipal Solid Waste Management in Constantine, Algeria. *Journal of Geoscience and Environment Protection*. 2017. № 5. P. 25–31.
3. Krush P., Shevchuk N. Startup project. Recommendations for the implementation of the Master's thesis section "Startup project development". Kiev: KPI them. Igor Sikorsky, 2019, P. 50.
4. Kiryanov, Dmitriy Samouchitel Mathcad 13 / Dmitriy Kiryanov. - M.: BHV-Peterburg, 2006. - 761 s.
5. Trofimov I.L., Yakovleva A.V. Analiz potentsialu tverdykh pobutovykh vidhodiv yak sirovini dlya virobnitstva alternativnih paliv v Ukraini. *Energetika: ekonomika, tehnologiya, ekologiya*. Kyiv, 2016. S. 105–111.

Надійшла 22.01.2020

Received 22.01.2020