

*В. М. Чупа, Я. О. Адаменко  
Івано-Франківський національний  
технічний університет нафти і газу*

## **ДОСЛІДЖЕННЯ РІВНЯ ЗОЛЬНОСТІ ТА ВМІСТУ ХІМІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ В ЗОЛІ РІЗНИХ ВИДІВ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ ТА ТВЕРДОПАЛИВНИХ ПЕЛЕТ**

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 зольність та вміст хімічних елементів в золі, зокрема важких металів.

Останнім часом проблема відходів стає все більш актуальною у зв'язку зі зростанням кількості відходів та негативним впливом на навколишнє середовище. Одним зі способів зменшення кількості відходів є їх переробка на паливо. Тверді побутові відходи та твердопаливні пелети є джерелом енергії, але вони також можуть містити важкі метали, які можуть бути шкідливі для здоров'я людини та навколишнього середовища.

Проведено дослідження зольності різних типів відходів, деревних твердопаливних пелет зроблених з різної деревини. Під час виїзної експедиції на полігон твердих побутових відходів (ТПВ) в с. Рибне були зібрані зразки відходів для подальшого дослідження. Було проведено аналіз рівня зольності суміші відходів, який відповідає морфологічному складу полігону твердих побутових відходів у селі Рибне, та зроблений подальший аналіз золи на вміст важких металів. Також, проведено аналіз зольності та дослідження золи на вміст хімічних елементів суміші деревних твердопаливних пелет, що було зроблене з різних видів деревини.

Досліджено рівень зольності для різних видів відходів (пластик, біо-відходи, гума, папір, текстиль, дерево, тощо) та різних видів твердопаливних деревних пелет (дуб, бук, хвоя, тощо). Розроблено графік для порівняння показника калорійності різних видів відходів та пелет до рівня їх зольності. Для спрощення розрахунку застосовувалось програмне забезпечення Microsoft Excel. При визначенні використовувались реальні значення калорійності, що були отримані під час лабораторного дослідження за допомогою калориметра ІКА С1, показники зольності отримані методом озолення зразків у муфельній печі з подальшим зважування зразків, та дослідженням хімічного складу зразків на на прецизійному аналізаторі EXPERT 3L з постійною подачею гелію у канали коліматора.

**Ключові слова:** тверді побутові відходи, термічне знешкодження, калорійність, зольність, важкі метали.

**Постановка проблеми.** Проблема твердих побутових відходів (ТПВ) є великою загрозою в Україні та в багатьох інших країнах, оскільки обсяги утворення цих відходів постійно зростають. Це призводить до утворення величезних звалищ ТПВ поруч з містами. Для регулювання управління відходами, ЄС встановив «Рамкову директиву ЄС про відходи», яка встановлює правила збору, утилізації та переробки всіх видів відходів [1].

Технології перетворення відходів в енергію (Waste-to-energy – WtE) розвиваються як різноманітні методи очищення від відходів з метою перетворення їх на електроенергію, тепло, паливо та інші корисні матеріали. Процес WtE залишає за собою залишки відходів, такі як зола, шлак, котельна зола, стічні води та викиди.

В останні роки, в багатьох країнах з'явився інтерес до нових екологічно безпечних та безвідходних технологій термічної переробки побутових відходів з утворенням горючих газів. Хоча не існує універсального методу переробки ТПВ, комбінований метод, який використовує відходи як джерело енергії та вторинну сировину, є найбільш прийнятним методом [2].

**Метою роботи** є визначення рівня зольності відходів, по різних їх типах, а також, зольності твердопаливних пелет, порівняти кількість теплової енергії з рівнем зольності та проаналізувати вміст хімічних елементів, зокрема важких металів, що присутні в золі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідження складу та кількості золи під час термічної утилізації твердих побутових відходів присвячено чимало робіт українських науковців. Питанням екологічної безпеки ТПВ після спалювання займалися Г. А. Кроїк, В. О. Дзюба,

О. В. Шевченко [3]. Визначенням вмісту токсичних сполук в золі після спалювання ТПВ досліджували А. М. Демків, В. Л. Сидоренко С. І. Азаров [4].

**Викладення основного матеріалу.** При плануванні процесу спалювання суміші твердих побутових відходів (ТПВ) враховуються багато факторів, таких як технологія утилізації, морфологічний склад, потреба у попередній підготовці відходів (сортування, подрібнення), стан відходів, їх фракційний склад та вологість, а також шлак і зола що утворюється в процесі спалювання. Зольність палива є одним із найважливіших показників який треба враховувати. [5].

Для оцінки морфологічного складу ТПВ були використані усереднені дані за 2020-2021 роки, що були надані КП "Полігон ТПВ". Ці дані були отримані згідно з методичними рекомендаціями, затвердженими Міністерством з питань житлово-комунального господарства України 16 лютого 2010 року № 39 [6]. Встановлено, що приблизно 64-68% ТПВ, що надходять на полігони, придатні для відновлення енергії. Близько 32% ТПВ не придатні для одержання енергії, оскільки вони є негорючими, включають скло та метал, а також несортований залишок, який не враховується під час лабораторних досліджень та розрахунку енергетичного потенціалу ТПВ.

Після проведення дослідження калорійності відходів та пелет, було проведено дослідження зольності всіх видів палива, а саме 7 проб ТПВ по різних їх видах, 7 проб твердопаливних пелет з різних порід дерев та 2 проби сумішей: 1) суміш, що відповідає морфологічному складу ТПВ полігону с. Рибне, 2) усереднена суміш деревних пелет [7].

Підготовлено 16 проб по 5 г. згідно встановленого компонентного складу, що наведено в табл. 1, також була підготовлене інша група дослідних зразків.

Таблиця 1

**Опис досліджуваних компонентів ТПВ і пелет у зразках**

| Види пелет               | Компоненти ТПВ               | Опис проб ТПВ                                                                                                        |
|--------------------------|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Дуб                      | Папір та картон              | Папір та картон різного розміру та різної щільності не придатний для сортування як сировина через забрудненість      |
| Хвоя-30% Бук-30% Дуб 40% | Пластик                      | PET – 21,8%; LDPE – 1,85%; LDDE – 1,8%; PP – 3,49%; HDPE – 8,7%; PS – 1,3%; інші невстановлені види пластику – 61,1% |
| Хвоя-50% Бук-30% Дуб 20% | Дерево                       | Гілки дерев та тирса різного розміру                                                                                 |
| Топінамбур               | Текстиль                     | Шматки різноманітних тканин                                                                                          |
| Хвоя (1)                 | Гума та шкіра                | Взуття, ущільнення тощо                                                                                              |
| Хвоя (2)                 | Біо-відходи                  | Суміш органічних решток (фрукти, овочі тощо)                                                                         |
| Бук                      | Несортований горючий залишок | Шматки пінопласту та інший несортований горючий залишок                                                              |

Групи проб відходів та твердопаливних пелет готувались до проведення аналізів з метою визначення зольності та хімічного складу та вмісту важких металів в золі. Для проведення передбачених досліджень попередньо прожарений тигель, який зберігався в ексікаторі з осушуючою речовиною, зважують на вагах з точністю до 0,0002 г. Потім із аналітичної проби палива, бралась наважка масою (5±0,1) г. Тигель з наважкою зважують на вагах з точність до 0,0002 г. Маса пустого тигля та маса з наважкою віднімається, для визначення точної ваги зразка. Підготовка зразків включала в себе: (а) – підготовка тигля, (б) – готування суміші, (в) – проведення озолення зразка у муфельній печі (рис. 1).

Прокалювання зразків проводилось в муфельній печі SNOL 8.2/1100 при температурі 810 °С. Після процесу озолення тиглі повторно зважувались разом із золою, що утворилася. Потім розраховувався вміст золи із загальної маси проби у відсотках.

Зольність досліджуваної проби визначають за формулою, %:

$$A^a = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100\%, \quad (1)$$

де  $m_1, m_2, m_3$  – маса тигля відповідно прожареного, з наважкою проби палива, із зольним залишком після прожарювання, г.

Після розрахунків отримуємо значення зольності та прирівнюємо їх до калорійності (табл. 2).



Рис. 1. Підготовка зразків ТПВ і пелет для визначення зольності

Таблиця 2

## Калорійність та зольність досліджуваних проб

| Вид палива                           | Калорійність (Дж/г) | Зольність (%) |
|--------------------------------------|---------------------|---------------|
| Папір, картон                        | 13457               | 7,83          |
| Пластик                              | 39970               | 0,61          |
| Текстиль                             | 17580               | 0,55          |
| Дерево                               | 17947               | 2,1           |
| Гума                                 | 32373               | 55,1          |
| Біо-відходи                          | 13637               | 37,8          |
| Несортований горючий залишок         | 9622                | 23,3          |
| Дуб                                  | 18313               | 1,13          |
| Хвоя-30% Бук-30% Дуб 40%             | 18399               | 1,24          |
| Хвоя-50% Бук-30% Дуб 20%             | 17882               | 1,21          |
| Топінамбур                           | 17728               | 0,8           |
| Хвоя (1)                             | 17643               | 1,27          |
| Хвоя (2)                             | 17693               | 1,25          |
| Бук                                  | 17668               | 1,03          |
| Усереднена суміш пелет               | 17947               | 0,51          |
| Суміш відходів Рибненського полігону | 18488               | 3,89          |

Також, із попередніх досліджень за допомогою калориметра ІКА С1 було встановлено калорійність для кожного із зразків твердопаливних деревних пелет та їх усередненої суміші, та різних типів відходів, а також суміші ТПВ відповідно до морфологічного складу придатного для спалювання, полігону с. Рибне.

Згідно отриманих даних в таблиці наведеній вище можна отримати візуалізацію отриманих даних за допомогою зведеного графіка (рис. 2).

Проаналізувавши графік можна зазначити, що найбільший показник зольності спостерігається в зразках гуми – 55,1%, біо-відходів – 37,8% та в несортованого горючого залишку – 23,3%. При цьому найкраще співвідношення калорійності (39970 Дж/г.) до зольності (0,61%) в зразках пластику. Також найгірше співвідношення калорійності (13637 Дж/г.) до зольності (37,8%) спостерігається в зразках біо-відходів.

Дослідження вмісту важких металів в золі спалених ТПВ та твердопаливних пелет проводився на приладі EXPERT 3L (рис. 3). Для проведення аналізу проби ТПВ та пелет потрібно підготувати, їх необхідно нагріти у муфельній печі при температурі 800-830°C до повного перетворення зразків на золу.

Принцип роботи EXPERT 3L базується на методі спектрального аналізу спектрів флюоресценції елементів випромінених при адсорбції високоенергетичного випромінювання, іншими словами – рентгенофлюоресцентний аналіз. Атоми досліджуваного об'єкту збуджуються рентгенівським-, гамма – чи іонізуючим випромінюванням (на противагу до методів WDS чи EDX,

де збудження відбувається пучком електронів). При взаємодії атомів речовини з високоенергетичним випромінюванням, електрони близькі до ядра атома вибиваються із своїх орбіталей.

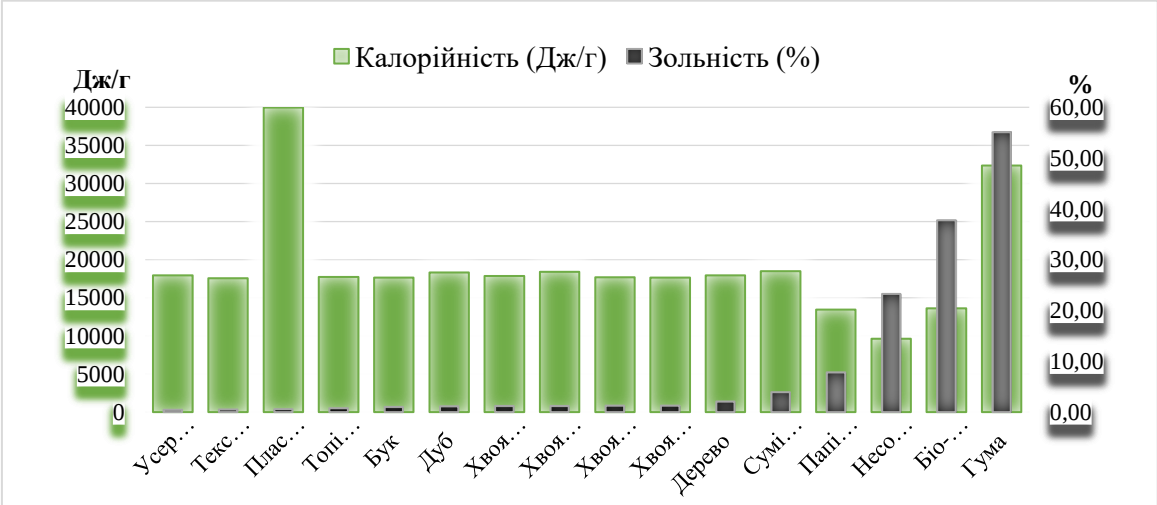


Рис. 2. Графік порівняння рівня калорійності та зольності палива

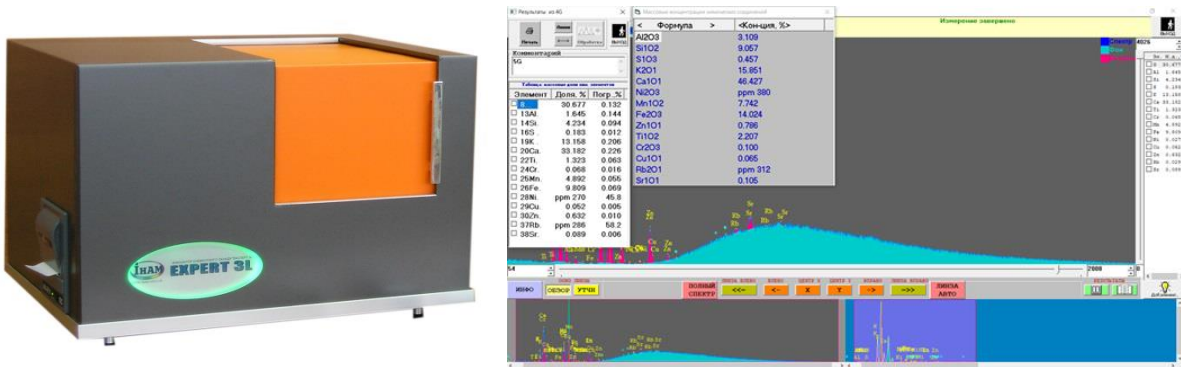


Рис. 3. Прилад EXPERT 3L та його інтерфейс

При цьому електрони з вищих енергетичних орбіталей займають їх місце, виділяючи при цьому фотони - характеристичне флюоресцентне випромінювання. Тобто відбувається емісія випромінювання з меншою енергією за поглинуту. За допомогою різноманітних детекторів (PIN diode, Si(Li), Ge(Li), Silicon Drift Detector SDD) реєструють спектр флуоресценції. За положенням максимумів у спектрі випромінювання можна провести якісний елементарний аналіз такого спектру флуоресценції, а за їх величиною, використавши еталонні зразки, зробити кількісний аналіз.

Дані що були отримані під час проведення аналізу на вміст токсичних хімічних речовин та важких металів в золі ТПВ та твердопаливних пелетах наведені (табл. 3, 4).

Таблиця 3

Вміст хімічних елементів (важких металів) в ТПВ полігону с. Рибне

| Вміст хімічних елементів у золі (%) | Вид палива    |          |          |          |          |             |                              |                                      |
|-------------------------------------|---------------|----------|----------|----------|----------|-------------|------------------------------|--------------------------------------|
|                                     | папір, картон | пластик  | текстиль | дерево   | гума     | біо-відходи | несортований горючий залишок | суміш відходів Рибненського полігону |
| 1                                   | 2             | 3        | 4        | 5        | 6        | 7           | 8                            | 9                                    |
| O                                   | 41,78500      | 33,04000 | 35,68100 | 39,01300 | 27,15100 | 27,41700    | 28,82400                     | 25,01320                             |
| Mg                                  | 0,00000       | 0,00000  | 0,66500  | 1,56400  | 1,35200  | 2,55100     | 1,06100                      | 0,00000                              |
| Al                                  | 13,03200      | 1,54000  | 0,70400  | 9,98700  | 8,78800  | 2,62800     | 3,38000                      | 0,62340                              |
| Si                                  | 15,79000      | 4,12600  | 7,15800  | 12,68700 | 7,54200  | 1,48100     | 3,56900                      | 3,04660                              |

Продовження табл. 3

| 1  | 2        | 3        | 4        | 5        | 6        | 7        | 8        | 9        |
|----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| P  | 0,00000  | 0,00000  | 2,70200  | 0,58200  | 2,84100  | 6,02000  | 1,43400  | 0,05780  |
| S  | 0,42100  | 0,76300  | 2,10000  | 1,70800  | 0,95600  | 1,85200  | 1,14100  | 0,89420  |
| Cl | 0,00000  | 2,20600  | 0,00000  | 2,38300  | 3,45100  | 5,21100  | 5,24700  | 15,88420 |
| K  | 0,00000  | 1,32600  | 1,72600  | 9,23900  | 1,97800  | 51,02700 | 24,99900 | 12,81280 |
| Ca | 25,27100 | 42,14800 | 25,41200 | 20,19900 | 19,25400 | 1,44000  | 26,67500 | 34,09900 |
| Ti | 0,98000  | 10,75200 | 19,01000 | 0,64200  | 36,47200 | 0,00032  | 1,07900  | 1,19300  |
| Cr | 0,12300  | 0,53000  | 0,76200  | 0,00000  | 8,78800  | 0,00000  | 0,00046  | 0,37180  |
| Mn | 0,00045  | 0,05900  | 0,05500  | 0,99200  | 0,95600  | 0,00022  | 0,05600  | 0,21900  |
| Fe | 0,99700  | 2,72700  | 0,05600  | 0,79700  | 0,38500  | 0,24600  | 1,77900  | 4,78920  |
| Ni | 0,00076  | 0,00037  | 0,22100  | 0,00000  | 1,90100  | 0,00037  | 0,00046  | 1,69450  |
| Cu | 0,00030  | 0,08800  | 0,00038  | 0,00015  | 0,46800  | 0,00011  | 0,05400  | 0,14000  |
| Zn | 0,10900  | 0,12700  | 0,00000  | 0,12100  | 0,00018  | 0,00020  | 0,34400  | 0,60840  |
| Ga | 0,00036  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00041  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  |
| Br | 0,00010  | 0,41600  | 0,00000  | 0,00044  | 0,00005  | 0,00031  | 0,07000  | 0,21280  |
| Rb | 0,00023  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00009  | 0,00042  | 0,00057  | 0,00000  |
| Sr | 0,00067  | 0,00013  | 0,00000  | 0,00010  | 0,00028  | 0,00024  | 0,00013  | 0,06090  |
| Zr | 0,00012  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00002  | 0,00000  | 0,00019  | 0,00000  |
| Mo | 0,00000  | 0,00063  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00018  | 0,00000  | 0,00043  | 0,00000  |
| Sb | 0,00000  | 0,08100  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00009  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  |
| Pd | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00006  | 0,00016  | 0,00014  | 0,00000  |
| I  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00038  | 0,00023  | 0,00000  | 0,00000  |
| Re | 0,00091  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  |
| Ir | 0,00045  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  |
| Ru | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  |
| Sn | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  |
| Nb | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00008  |
| Ag | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00008  |
| Cd | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00004  |
| Pb | 0,06500  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00018  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  | 0,01640  |

Таблиця 4

## Вміст хімічних елементів (важких металів) в твердопаливних пелетах

| Вміст хімічних елементів у золі (%) | Вид палива |                                   |                                   |           |          |          |          |                        |
|-------------------------------------|------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------|----------|----------|----------|------------------------|
|                                     | дуб        | хвоя-30%,<br>бук-30%,<br>дуб- 40% | хвоя-50%,<br>бук-30%,<br>дуб- 20% | топінабур | хвоя (1) | хвоя (2) | бук      | усереднена суміш пелет |
| 1                                   | 2          | 3                                 | 4                                 | 5         | 6        | 7        | 8        | 9                      |
| O                                   | 30,11700   | 28,91100                          | 29,66500                          | 26,86500  | 30,67700 | 30,25000 | 35,76200 | 30,32100               |
| Mg                                  | 0,00000    | 0,00000                           | 0,00000                           | 0,61700   | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  | 0,08814                |
| Al                                  | 2,02500    | 1,61300                           | 1,49900                           | 1,60600   | 1,64500  | 1,64500  | 1,88400  | 1,70243                |
| Si                                  | 2,79100    | 2,75300                           | 3,09600                           | 2,59000   | 4,23400  | 3,16100  | 13,53100 | 4,59371                |
| P                                   | 0,00000    | 0,00000                           | 0,00000                           | 0,52000   | 0,00000  | 0,44200  | 0,78700  | 0,24986                |
| S                                   | 0,42700    | 0,48600                           | 0,21200                           | 0,22000   | 0,18300  | 0,20900  | 0,11800  | 0,26500                |
| Cl                                  | 0,00000    | 0,00000                           | 0,00000                           | 1,08900   | 0,00000  | 0,00000  | 0,00000  | 0,15557                |
| K                                   | 16,49200   | 18,65200                          | 13,80100                          | 28,38100  | 13,15800 | 14,68500 | 13,29900 | 16,92400               |
| Ca                                  | 33,96400   | 35,20800                          | 36,53800                          | 35,82500  | 33,18200 | 37,89100 | 20,04300 | 33,23586               |
| Ti                                  | 3,12800    | 0,74500                           | 0,66900                           | 0,18000   | 1,32300  | 0,42500  | 1,40100  | 1,12443                |
| Cr                                  | 0,00000    | 0,00000                           | 0,00000                           | 0,00000   | 0,06800  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00971                |
| Mn                                  | 5,58800    | 2,68800                           | 3,12300                           | 0,22400   | 4,89200  | 7,44400  | 1,64300  | 3,65743                |
| Fe                                  | 4,64400    | 8,01000                           | 10,92100                          | 1,48000   | 9,80900  | 3,32500  | 10,97700 | 7,02371                |
| Ni                                  | 0,00047    | 0,05400                           | 0,00029                           | 0,00005   | 0,00027  | 0,00000  | 0,00000  | 0,00787                |
| Cu                                  | 0,10500    | 0,08100                           | 0,00049                           | 0,00019   | 0,05200  | 0,05300  | 0,00032  | 0,04171                |
| Zn                                  | 0,35700    | 0,56900                           | 0,17600                           | 0,15200   | 0,63200  | 0,37400  | 0,20100  | 0,35157                |

Продовження табл. 4

| 1  | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Ga | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00007 | 0,00001 |
| Br | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| Rb | 0,00049 | 0,00030 | 0,00037 | 0,00013 | 0,00029 | 0,00000 | 0,00028 | 0,00026 |
| Sr | 0,12300 | 0,10200 | 0,10100 | 0,19600 | 0,08900 | 0,09700 | 0,08000 | 0,11257 |
| Zr | 0,00041 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00007 | 0,00000 | 0,00000 | 0,05300 | 0,00764 |
| Mo | 0,00038 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00005 |
| Sb | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| Pd | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| I  | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| Re | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| Ir | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| Ru | 0,06500 | 0,00031 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00933 |
| Sn | 0,00000 | 0,06900 | 0,00048 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00993 |
| Nb | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| Ag | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00012 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00002 |
| Cd | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| Pb | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00038 | 0,00005 |

Основні хімічні речовини та сполуки, які зустрічаються при аналізі даних зразків, а саме токсичні елементи та важкі метали характеризуються малими концентраціями. Частка важких металів і шкідливих для здоров'я людини хімічних елементів не перевищує допустимі норми. Вміст та склад ТПВ є мінливим показником, тому рівні токсичних речовин в золі може змінюватись.

**Висновки.** Досліджено рівні зольності для різних груп відходів та твердопаливних деревних пелет. Пластикові відходи мають найбільшу ступінь калорійності при одній з найменших рівнів зольності, що є хорошим показником. Водночас найнижча калорійність спостерігається в біо-відходів при досить високому рівні зольності.

Розроблено порівняльний графік, який візуалізує відношення рівнів калорійності та зольності різних видів твердих побутових відходів та твердопаливних пелет.

Також досліджено вміст хімічних елементів в золі. Перевищення рівнів концентрацій токсичних хімічних речовин та важких металів не спостерігалось.

### Література

- 1 Директива 2008/98/ЄС про відходи. Режим доступу: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984\\_029-08#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_029-08#Text)
- 2 Директива 2010/75/ЄС про промислові викиди. Режим доступу: [https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/55-GOEEI/%202010\\_75\\_%D0%84%D0%A1.pdf](https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/55-GOEEI/%202010_75_%D0%84%D0%A1.pdf)
- 3 Kroik, G. A., V. O. Dzjuba, and O. V. Shevchenko. "До питання оцінки екологічної безпеки побутових відходів після вогневого знешкодження." *Journal of Geology, Geography and Geoecology* 16.3/2 (2008): 17-20.
- 4 Демків, А. М., В. Л. Сидоренко, and С. І. Азаров. "Лабораторні дослідження викидів токсичних сполук в процесі згоряння твердих побутових відходів." (2018).
- 5 Kanfoud S., Kouloughli S. Municipal Solid Waste Management in Constantine, Algeria. *Journal of Geoscience and Environment Protection*. 2017. № 5. P. 25–31.
- 6 Про звіт комунального підприємства «Полігон ТПВ» за 2019 рік та затвердження плану розвитку на 2020 рік [Електронний ресурс] // Івано-Франківська міська рада. – 2020. – Режим доступу: <http://www.namvk.if.ua/prdt/462069/>.
- 7 Чупа, В. М., Адаменко, Я. О., & Чупа, К. О. (2023). Дослідження термічного потенціалу різноманітних сумішей твердих побутових відходів до твердопаливних пелет. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*, 2(26), 149–154. [https://doi.org/10.31471/2415-3184-2022-2\(26\)-149-154](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2022-2(26)-149-154)

**V. Chupa, Ya. Adamenko**  
*Ivano-Frankivsk National  
Technical University of Oil and Gas*

## **STUDY OF ASH LEVEL AND CONTENT OF CHEMICAL ELEMENTS IN ASH OF DIFFERENT TYPES OF HOUSEHOLD SOLID WASTE AND SOLID FUEL PELLETS**

The article deals with the current issue of solid household waste management and focuses on the fact that the most effective method of reducing the amount of waste is heat treatment. Attention is paid to such important parameters during the incineration of solid household waste as the ash content and the content of chemical elements in the ash, in particular heavy metals.

Recently, the problem of waste is becoming more and more relevant due to the increase in the amount of waste and the negative impact on the environment. One of the ways to reduce the amount of waste is to convert it into fuel. Solid household waste and solid fuel pellets are a source of energy, but they can also contain heavy metals that can be harmful to human health and the environment.

A study of the ash content in various waste types and wood solid fuel pellets made from different types of wood was conducted. During the field trip to the landfill of solid household waste (SHW) in the village of Rybne the samples were taken for further research. The ash level of the waste mixture was analyzed, which corresponded to the morphological composition of the landfill of solid household waste in the village of Rybne, and a further analysis of the ash for the content of heavy metals was carried out. Also, the contents of ash and chemical elements in the mixture of wood solid fuel pellets made from different types of wood were analyzed.

The level of ash content for different types of waste (plastic, bio-waste, rubber, paper, textiles, wood, etc.) and different types of solid fuel wood pellets (oak, beech, pine, etc.) was studied. A graph was developed to compare the calorie content of different types of waste and pellets to their ash content. Microsoft Excel software was used to simplify the calculation. The study involved the actual calorific values obtained during laboratory research with the help of IKA C1 calorimeter, the ash content obtained by the method of ashing samples in a muffle furnace with subsequent weighing of samples, and the investigation of the chemical composition of samples on the EXPERT 3L precision analyzer with a constant supply of helium in collimator channels.

**Key words:** solid household waste, thermal disposal, caloric content, ash content, heavy metals.

### **Reference**

- 1 Dyrektyva 2008/98/Yes pro vidkhody. Rezhym dostupu: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984\\_029-08#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_029-08#Text)
- 2 Dyrektyva 2010/75/Yes pro promyslovi vykydy. Rezhym dostupu: [https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/55-GOEI/202010\\_75\\_%D0%84%D0%A1.pdf](https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/55-GOEI/202010_75_%D0%84%D0%A1.pdf)
- 3 Kroi'k, G. A., V. O. Dzjuba, and O. V. Shevchenko. "Do pytannia otsinky ekolohichnoi bezpeky pobutovykh vidkhodiv pislia vohnovoho zneshkodzhennia." *Journal of Geology, Geography and Geoecology* 16.3/2 (2008): 17-20.
- 4 Demkiv, A. M., V. L. Sydorenko, and S. I. Azarov. "Laboratorni doslidzhennia vykydiv toksychnykh spoluk v protsesi zghoriannia tverdykh pobutovykh vidkhodiv." (2018).
- 5 Kanfoud S., Kouloughli S. Municipal Solid Waste Management in Constantine, Algeria. *Journal of Geoscience and Environment Protection*. 2017. № 5. P. 25–31.
- 6 Pro zvit komunalnogo pidpriemstva «Polihon TPV» za 2019 rik ta zatverdzhennia planu rozvytku na 2020 rik [Elektronnyi resurs] // Ivano-Frankivska miska rada. – 2020. – Rezhym dostupu: <http://www.namvk.if.ua/prdt/462069/>.
- 7 Chupa, V. M., Adamenko, Ya. O., & Chupa, K. O. (2023). Doslidzhennia termichnogo potentsialu riznomanitnykh sumishei tverdykh pobutovykh vidkhodiv do tverdopalyvnykh pelet. *Ekolohichna bezpeka ta zbalansovane resursokorystuvannia*, 2(26), 149–154. [https://doi.org/10.31471/2415-3184-2022-2\(26\)-149-154](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2022-2(26)-149-154)