

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Шабельник Ілона Юріївна

УДК 504.628.477.8

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СПАЛЮВАННЯ ТВЕРДИХ
ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ ШЛЯХОМ ЇХ ПОПЕРЕДНЬОГО
СПУШЕННЯ**

Спеціальність 101 – Екологія

Автореферат
магістерської дисертації на здобуття
ступеня магістра

Київ – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі інженерної екології Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

кандидат технічних наук,
СЕРБІНОВА Лариса Анатоліївна,
Національний технічний університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського»,
асистент кафедри інженерної екології;

Рецензент:

кандидат технічних наук,
МАЙСТРЕНКО Володимир Володимирович,
Національний науково-дослідний інститут
промислової безпеки та охорони праці,
завідувач лабораторії інформаційних систем.

Захист відбудеться «25» травня 2018 р. о 14:00 годині на кафедрі інженерної екології Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, вул. Борщагівська, 115, корпус 22, ауд. 201.

З магістерською дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги 37.

Автореферат розісланий «___» _____ 2018 р.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Зростання споживання, особливо в великих містах України, призводить до збільшення обсягів утворення ТПВ. Основною технологією утилізації таких відходів в нашій країні є їх захоронення на полігонах та на несанкціонованих звалищах. Відходи, при їх неконтрольованому розміщенні на звалищах, негативно впливають на навколишнє середовище. Це відбувається через надходження шкідливих хімічних і біологічних речовин в ґрунті та поверхневі води, атмосферне повітря та ґрунт. Тому, запобігання потрапляння шкідливих речовин з відходів в навколишнє середовище є актуальним завданням екологічної безпеки при поводженні з комунальними відходами.

Проблеми переробки та утилізації побутових відходів пов'язані зі складністю їх морфологічного складу. До теперішнього часу не існує універсальної технології їх переробки і утилізації, що забезпечила б найвищий рівень їх енергетичного рециклінгу.

Складність вирішення проблем утилізації побутових відходів обумовлюється складністю вирішення багатофакторної задачі еколого-економічного обґрунтування вибору конкретної технології утилізації побутових відходів.

У той же час ТПВ можна використовувати як паливо для генерування додаткової теплової та електричної енергії. ТПВ – це альтернативне джерело енергії, яке можна назвати невичерпним, яке не вимагає видобутку. Нажаль, ТПВ вимагають переробки і транспортування.

ТПВ містить у собі такі горючі компоненти, як папір, картон, деревина, текстиль, шкіра, гума, полімерна упаковка та інше. У зв'язку з цим підвищення ефективності спалювання ТПВ є актуальним завданням. Це також відповідає Директиві 2008/98/ЄС «Про відходи», в якій ТПВ визначені як вторинний матеріал та енергетичний антропогенний ресурс.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі інженерної екології Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» (КПІ ім. Ігоря Сікорського) та охоплює задачі, які визначені:

- «Програмою поводження з твердими побутовими відходами» № 265 від 04.03.2004;
- розділом 3 «Стратегії державної екологічної політики України на період до 2020 року»;
- «Державною цільовою економічною програмою енергоефективності і розвитку сфери виробництва енергоносіїв з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2010-2020 роки» № 243 від 01.03.2010.

Мета та задачі дослідження. *Метою роботи* є підвищення енергетичної ефективності процесу спалювання ТПВ підвищенням їх теплотворної здатності.

Для досягнення поставленої мети сформульовані наступні **задачі**:

1. Визначення характеру залежності температури згоряння ТПВ від їх морфологічних властивостей;
2. Визначення раціонального способу термічної утилізації ТПВ за енергетичним критерієм та чинників, що впливають на енергоефективність спалювання ТПВ;
3. Розробка процесів щодо вдосконалення бункерного приміщення з метою зменшення вологості відходів;
4. Визначення енергоефективності спалювання ТПВ без додаткового просушення ТПВ та з додатковим просушенням ТПВ;
5. Встановлення залежності енергоефективності спалювання ТПВ від вологості відходів;
6. Розробка методики розрахунку енергоефективності спалювання ТПВ в залежності від їх вологості.
7. Обґрунтування екологічного та економічного ефектів від модернізації бункерного приміщення для ТПВ з метою зменшення вологості відходів.

Об'єкт дослідження – підвищення ефективності спалювання ТПВ шляхом зниження їх вологості та спущення.

Предмет дослідження – закономірності впливу морфологічних властивостей ТПВ на їх теплотворну здатність та енергоефективність спалювання ТПВ.

Методи дослідження. При проведенні дослідження використані наступні методи: *методом аналізу ієрархій* визначено раціональний спосіб термічної утилізації ТПВ та домінантні чинники, що впливають на енергоефективність спалювання ТПВ; *методами порівняння та аналізу* визначено та запропоновано процес зменшення вологості ТПВ, які надходять до ПАТ «Київенерго» Філіал «Завод "Енергія"», відповідно до Basel IWB; *методом теоретичного моделювання* встановлено залежність теплотворної здатності ТПВ від вологості; *методом синтезу* оцінки енергоефективності спалювання ТПВ встановлено залежність між енергоефективністю спалювання ТПВ та вологістю ТПВ.

Наукова новизна одержаних результатів, що виноситься на захист, представлена науковими положеннями, в яких *вперше*:

- визначено залежність енергоефективності спалювання ТПВ від вологості відходів;
- розроблено математичну модель визначення енергоефективності спалювання ТПВ в залежності від вологості відходів;
- запропоновано та розроблено схему вдосконалення бункерного приміщення з метою зменшення вологості ТПВ для умов України.

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:

- зафіксовано збільшення теплоти згоряння ТПВ майже вдвічі з 979 ккал/кг до 2204 ккал/кг від вологості з 61 % до 30% для умов ПАТ «Київенерго» Філіал «Завод "Енергія"»;
- зафіксовано підвищення енергоефективності спалювання ТПВ для умов ПАТ «Київенерго» Філіал «Завод "Енергія"» на 4 % за допомогою додаткового просушування ТПВ з 61 % до 30 % вологості ТПВ та виробництво теплової енергії майже вдвічі з 150000 Гкал/рік до 268115 Гкал/рік відповідно;
- розроблено методику розрахунку енергоефективності спалювання ТПВ в залежності від вологості.

Особистий внесок здобувача полягає у формулюванні ідеї, мети, задач досліджень, наукової новизни, аналізу результатів, розробці рекомендацій та методики розрахунку. У роботі [1]: виконано оцінку впливу виробничої діяльності сміттєспалювального заводу «Енергія» на навколишнє середовище; у роботі [2]: виконано оцінку впливу морфологічних властивостей твердих побутових відходів на їх теплотворну здатність.

Апробація результатів наукової роботи. Наукові роботи за темою дисертації доповідались та були відмічені на **конференціях**: на V науково-технічній конференції «Енергетика. Екологія. Людина», 24-26.10.2012; на XII Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів, присвяченої пам'яті професора Я. І. Мовчана (з міжнародною участю), 19.04.2018.

Публікації. Результати досліджень опубліковано у 2 наукових працях.

Об'єм і структура роботи. Дисертація викладена на 103 сторінках, складається зі вступу, 4 розділів та заключення, уміщує 22 рисунків, 20 таблиць, 25 формул, список використаних джерел із 54 найменувань на 7 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **ВСТУПІ** відмічено, що магістерська дисертація направлена на підвищення енергоефективності спалювання ТПВ шляхом удосконалення технології підготовки відходів до спалювання, а саме зменшення вмісту вологості у ТПВ. Визначено актуальність теми, зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, мету і завдання дослідження, об'єкт, предмет та методи дослідження, наукові положення та новизну одержаних результатів, практичне значення. Викладено дані щодо апробації та публікації результатів досліджень, об'єм і структура роботи.

У **ПЕРШОМУ РОЗДІЛІ** проведено аналіз впливу морфологічних властивостей ТПВ на їх теплотворну здатність та визначено раціональний спосіб термічної утилізації ТПВ методом аналізу ієрархій.

Визначено чинники, які впливають на теплотворну здатність ТПВ:

- вологість ТПВ;

– морфологічний склад ТПВ: співвідношення в них горючих компонентів (папір, текстиль, шкіра, деревина, пластмаса, гума і т. д.) і негорючих (метал, скло, каміння, шлаки, зола і т.д.).

Встановлено, що зі збільшенням вологості, зольності (вміст негорючої частини ТПВ) прямо пропорційно знижується теплота згоряння ТПВ, а відповідно, і теплоефективність. Трикутник Таннера встановлює зв'язок між зольністю, вологістю, горючою частиною палива і його здатністю самостійно підтримувати горіння. Рисунок 1 показує, що паливо, яке має більше 60% зольності, більше 50% вологості і менше 30% горючої частини, не здатне самостійно підтримувати горіння.

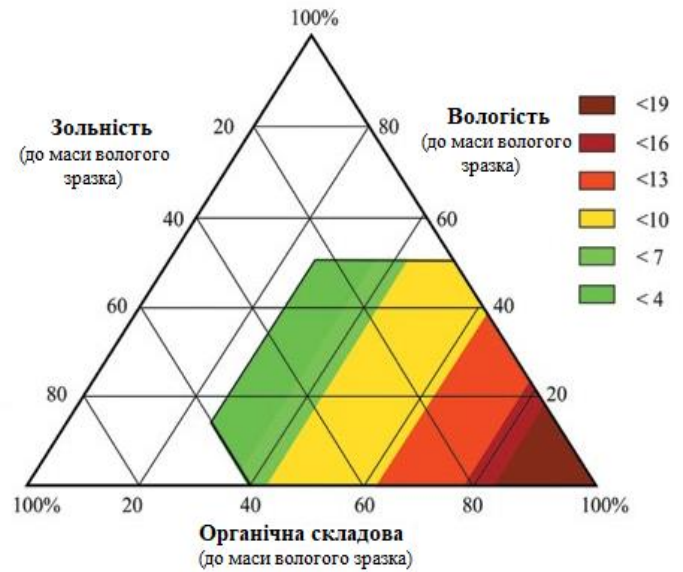


Рисунок 1 – Трикутник Таннера

В умовах великого міста найкомпактнішим, маловідходним і порівняно дешевим способом знезараження та утилізації ТПВ є термічний спосіб, який можна реалізувати трьома основними методами та вимагає ефективної системи очищення відхідних газів: пряме спалювання, піроліз, плазмова газифікація.

За літературними джерелами визначено наступні переваги й недоліки способів термічної утилізації ТПВ:

– Технології піролізу і плазмової переробки ТПВ не мають необхідної технології для переробки великих обсягів ТПВ.

– З точки зору мінімізації утворення ТПВ технологія прямого спалювання має помітну перевагу (до 500 т/добу).

– Метод плазмової переробки є найбільш енерговитратним і має високі експлуатаційні витрати через сушіння до певного значення залишкової вологості ТПВ (для чого необхідні додаткові площі, обладнання та енергоресурси) та дроблення всього сміття до фракції 20-40 см.

– Здійснення процесу піролізу, а також використання продуктів цього процесу, вимагають багатоступеневих складних заходів, які не виправдовують його застосування для побутових відходів. Коефіцієнт корисної дії цього процесу дуже низький.

– При використанні сучасних технологій з очистки шкідливих речовин, які викидаються в атмосферне повітря під час прямого спалювання ТПВ, їх концентрація буде в межах норми, що свідчить про екологічність технології спалювання ТПВ.

– Процес прямого спалювання дозволяє використовувати енергію і тепло, які можна генерувати з відходів.

Порівняльні технологічні та енергетичні показники різних термічних технологій утилізації ТПВ представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняльні технологічні та енергетичні показники різних термічних технологій утилізації ТПВ

Показники	ТЕХНОЛОГІЯ		
	<i>Пряме спалювання</i>	<i>Піроліз</i>	<i>Плазмова газифікація</i>
ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ			
Температура спалювання ТПВ	650–1050 °С	450–900 °С (без доступу кисню) 800–1150 °С (звичайна газифікація)	від 1300 до 2000 °С
Попередня підготовка ТПВ	Попереднє сортування неорганічної складової ТПВ	Попереднє дроблення відходів	Попереднє подрібнення ТПВ
Чутливість до вологості ТПВ	Чутливий до вологості ТПВ	Вологість ТПВ близько 20%, при видаленні неорганічної частини до 40%	Не чутливий до вологості ТПВ
Обсяг ТПВ, який спалюється	до 500 т/добу	до 30 т/добу	до 110 т/добу
ЕНЕРГЕТИЧНІ ПОКАЗНИКИ			
Енергія виробленої пари	1,60 МВт-год/1 т ТПВ	1,20 МВт-год/1 т ТПВ	-
Електроенергія	0,40 МВт-год/1 т ТПВ	0,30 МВт-год/1 т ТПВ	0,5

Для визначення раціонального способу термічної утилізації ТПВ за методом аналізу ієрархій складено ієрархічну модель оцінки, рисунок 2. Складено матриці попарного порівняння для оцінки методів термічної утилізації ТПВ відповідно до *критеріїв*: обсяг ТПВ, який спалюється (т/добу), кількість виробленої пари з ТПВ (МВт-год/т ТПВ), чутливість до вологості ТПВ.

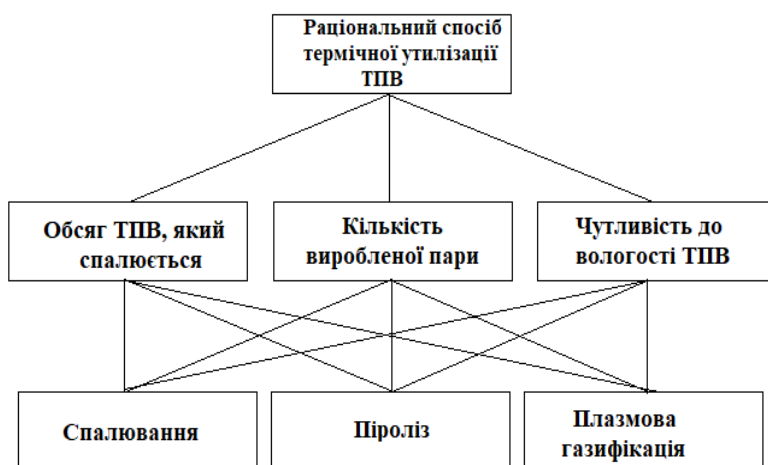


Рисунок 2 – Ієрархічна модель оцінки способів термічної утилізації ТПВ

Для вибору оптимального рішення складено матрицю (1):

$$\widetilde{W}_5 = \begin{vmatrix} W_{51} \\ W_{52} \\ W_{53} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} W_{11} & W_{21} & W_{31} \\ W_{12} & W_{22} & W_{32} \\ W_{13} & W_{23} & W_{33} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} W_{41} \\ W_{42} \\ W_{43} \end{vmatrix} \quad (1)$$

де W_{ij} – нормалізовані компоненти власного вектора.

Тоді,

$$\widetilde{W}_5 = \begin{vmatrix} W_{51} \\ W_{52} \\ W_{53} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0,71 & 0,64 & 0,07 \\ 0,068 & 0,3 & 0,17 \\ 0,22 & 0,049 & 0,75 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 0,62 \\ 0,3 \\ 0,085 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0,64 \\ 0,15 \\ 0,21 \end{vmatrix}$$

Обрано оптимальне рішення за формулою (2):

$$P_{\text{опт}}: \max |W_{51}; W_{52}; W_{53}| \quad (2)$$

Тоді,

$$P_{\text{опт}} = \max |0,64; 0,15; 0,21| = 0,64$$

За алгоритмом оптимального багатокритеріального вибору визначено раціональний спосіб термічної утилізації ТПВ – *пряме спалювання*.

Визначено домінантні чинники, які впливають на енергоефективність спалювання ТПВ:

- обсяг ТПВ, який спалюється, т/добу. Дає змогу зменшити навантаження на полігони захоронення ТПВ;
- кількість виробленої пари з ТПВ, МВт-год/1 т ТПВ. Утворення альтернативного джерела, пари або електроенергії, під час спалювання відповідає Директиві 2008/98/ЄС «Про відходи»;
- чутливість до вологості ТПВ. Високий вміст води вимагає використання додаткового енергетичного палива для підсушування ТПВ та підтримки температури в топці.

У **ДРУГОМУ РОЗДІЛІ** визначені домінантні чинники, за яких досягається стабільний та високий рівень теплотворної здатності ТПВ на Базельському сміттєспалювальному заводі та розроблено схему вдосконалення бункерного приміщення для умов ПАТ «Київенерго» Філіал «Завод "Енергія"».

Визначена схема поводження з відходами перед їх спалюванням, рисунок 3, та процес зменшення вологості відходів на Базельському сміттєспалювальному заводі:

- змішування ТПВ у бункері;
- підсушування та насичення повітрям відходів за рахунок потоків повітря від вентилятора, який встановлений у бункерному приміщенні;
- відсіювання сухіших відходів потоками повітря від вентилятора в

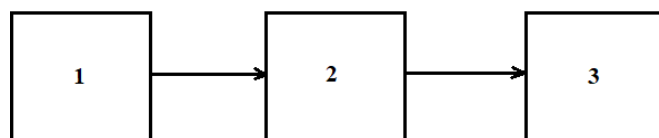


Рисунок 3 – Схема поводження з ТПВ перед їх спалюванням: 1) завантаження ТПВ у бункер; 2) процес зменшення вологості ТПВ; 3) спалювання ТПВ

іншій частині бункера, з подальшим завантаженням їх у топку;

– повітря, яке необхідне для горіння та стабілізації температури у камері згоряння, збирається з бункерного приміщення вентилятором, утилізуючи неприємний запах.

Визначено загальний недолік у процесі підготовки ТПВ для спалювання на сміттєспалювальному заводі «Енергія» – відсутність системи підсушування відходів, що суттєво впливає на їх теплотворну здатність, рисунок 4.

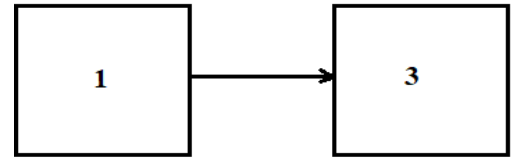


Рисунок 4 – Схема поводження з ТПВ перед їх спалюванням: 1) завантаження ТПВ у бункер; 3) спалювання ТПВ

На рисунку 5 представлено технологічну схему роботи заводу «Енергія». Недоліками наведеної технології є:

- використання іншого виду палива під час спалюванні ТПВ (відходи підсушують на колосникових решітках за допомогою природного газу);
- забруднення атмосферного повітря (необхідно передбачати газоочищення електрофільтрами);
- втрата вторинної сировини при загальному зборі сміття та відсутності сортування.

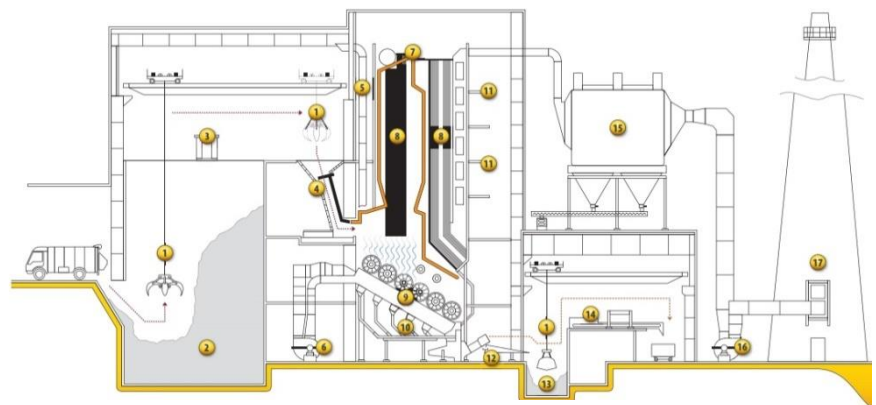


Рисунок 5 – Технологічна схема роботи заводу "Енергія", де 1 – грейферні крани, 2 – бункер ТПВ (18 тис.м²), 3 – кабіна управління краном, 4 – завантажувальна воронка, 5 – повітропровід, 6 – вентилятор первинного повітря, 7 – котел, 8 – екрани для відведення тепла, 9 – валкова решітка котла, 10 – лійки для відведення шлаку, 11 – майданчики обслуговування, 12 – похилий транспортер, 13 – бункер шлаку, 14 – лінія металовідбору, 15 – електрофільтр, 16 – димосос, 17 – димова труба, – тверді побутові відходи, – шлак, ~~~~~ – димові газы

Запропоновано на заводі «Енергія» впровадити систему підсушування ТПВ в бункері,

рисунок 6, що дозволить підвищити енергоефективність спалювання ТПВ, тобто збільшення генерування додаткової теплової енергії, а також спалювання ТПВ без додаткового палива (природного газу).

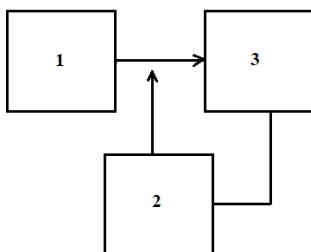


Рисунок 6 – Схема впровадження системи зменшення вологості на заводі «Енергія»: 1) завантаження ТПВ у бункер; 2) впровадження система зменшення вологості; 3) спалювання ТПВ

Для підвищення ефективності використання теплоти в системах децентралізованого теплопостачання ПАТ «Київенерго» Філіал «Завод "Енергія"» пропонується поєднання процесів поводження з ТПВ Базельського сміттєспалювального заводу, а саме встановлення вентилятора в бункерному приміщенні та створення зони для відсіювання сухіших відходів.

Бункер матиме три умовні зони, рисунок 7. В зоні (1) відбуватиметься гомогенізація, спущування та підсушування відходів потоками повітря з вентилятора. В зоні (2) відбуватиметься відсіювання сухіших відходів потоками повітря в зону (3). В зоні (3) гомогенізовані та підсушені відходи передаватимуть на спалювання. За допомогою грейферного крана відходи переміщуються із однієї зони бункера в іншу та перемішуються і гомогенізуються. В нижній частині бункера змонтована дренажна система для відведення надлишкової вологи і зневоднення відходів.

Для запобігання розповсюдження неприємних запахів за межі бункера з його верхньої частини за допомогою вентилятора забиратиметься повітря, яке далі підігріватиметься і подаватиметься до камери згоряння для горіння та стабілізації температури.

Економічний ефект досягається за рахунок:

- економії дорогого імпортного природного газу, який використовується для підсушування ТПВ на колосникових решітках;
- продажу більшої кількості теплоенергії споживачам;
- енерговигідної утилізації ТПВ замість витрат коштів на вивезення, складування

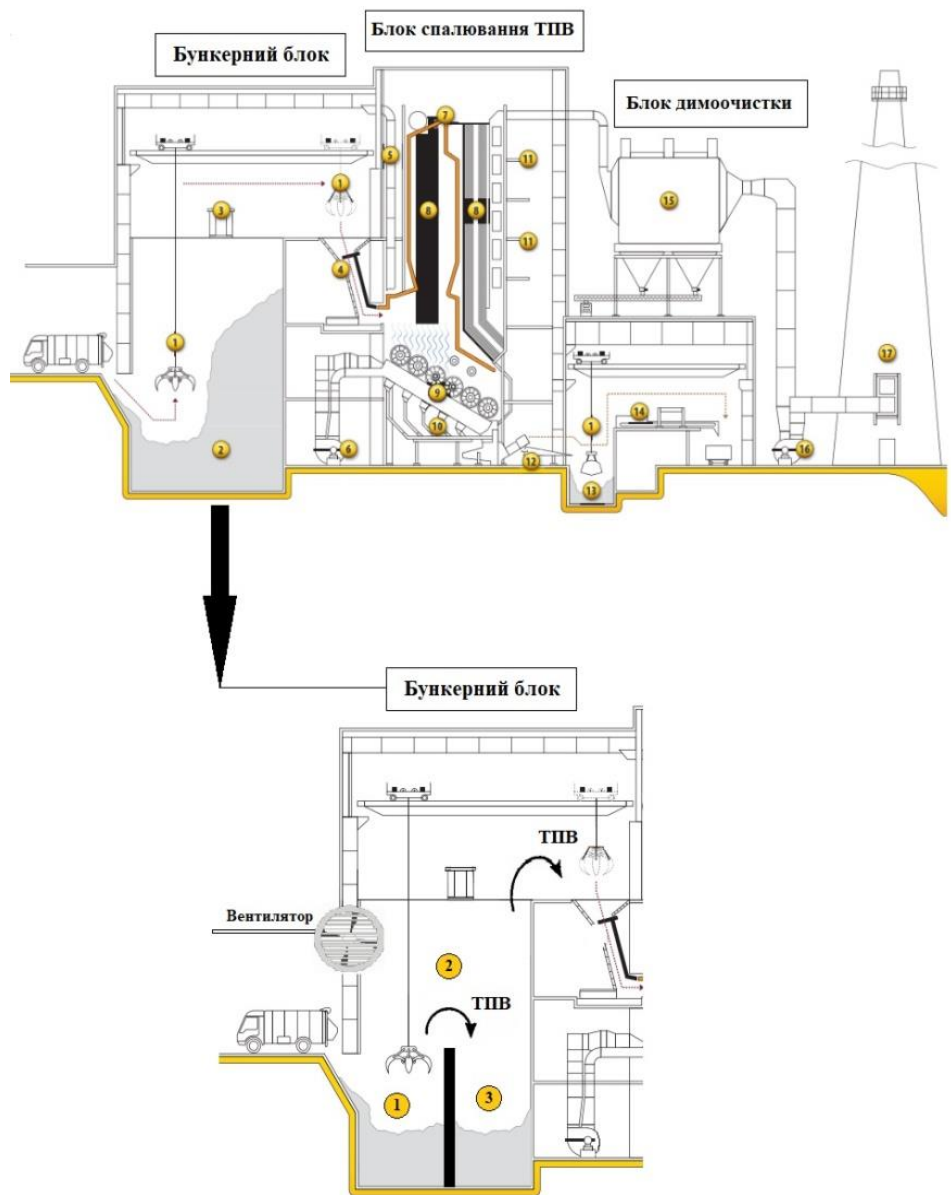


Рисунок 7 – Схема вдосконалення бункерного приміщення на заводі «Енергія»

та обслуговування ТПВ на сміттєзвалищах.

Екологічний ефект полягає у зменшенні навантаження на полігони ТПВ.

У **ТРЕТЬОМУ РОЗДІЛІ** встановлено залежність теплоти згоряння ТПВ від вологості та залежність енергоефективності спалювання ТПВ від вологості.

Виконано перерахунок теплотворної здатності ТПВ в залежності від вологості за (3) для умов сміттєспалювального заводу «Енергія». Результати розрахунку представлені у таблиці 2. На рисунку 8 представлено залежність теплоти згоряння від вологості для умов заводу «Енергія».

$$Q_{n(\text{ТПВ})}^p(W^p) = Q_{n(\text{ТПВ1})}^p \times \frac{1-W^p}{1-W_1^p} \quad (3)$$

де $Q_{n(\text{ТПВ1})}^p = 955$ ккал/кг – нижча теплота згоряння ТПВ, які надходять до сміттєспалювального заводу «Енергія»; $W_1^p = 61$ % – визначена за три сезони середня вологість ТПВ, які надходять до сміттєспалювального заводу «Енергія»; $Q_{n(\text{ТПВ})}^p$ – нижча теплота згоряння підсушених ТПВ.

Таблиця 2 – Результати розрахунку теплотворної здатності ТПВ, що надходять до сміттєспалювального заводу «Енергія», від вологості

Вологість ТПВ, %	Теплотворна здатність ТПВ, ккал/кг	Вологість ТПВ, %	Теплотворна здатність ТПВ, ккал/кг
10	2204	40	1469
15	2081	45	1347
20	1959	50	1224
25	1836	55	1102
30	1714	60	979
35	1592		

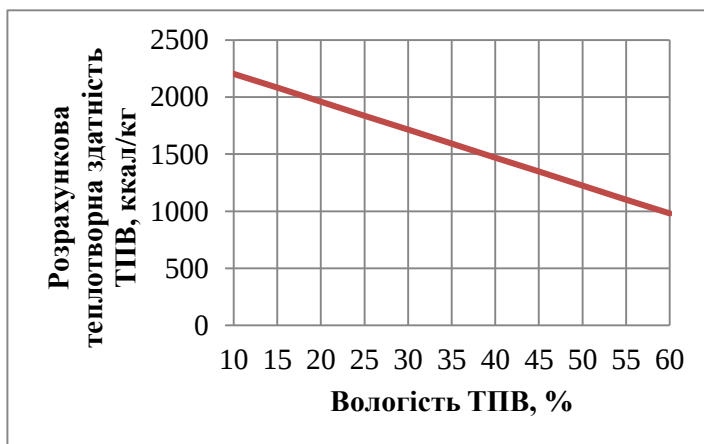


Рисунок 8 – Залежність теплотворної здатності ТПВ від вологості для умов сміттєспалювального заводу «Енергія»

Визначено залежність теплоти згоряння ТПВ, які надходять до сміттєспалювального заводу «Енергія», від вологості з 10 % до 60%. Теплотворна здатність відходів зменшувалась з 2204 ккал/кг до 979 ккал/кг відповідно. Встановлено, що зі збільшенням вологості відходів, що поступають на сміттєспалювальний завод «Енергія», прямо пропорційно знижується теплота згоряння ТПВ, а відповідно, і теплоефективність.

Оцінка за методом Таннера можливості горіння ТПВ при вологості, з якою ТПВ потрапляють до заводу «Енергія» (в середньому 61 %), показала, що відходи знаходяться поза межами зони горіння, що вказує на необхідність при їх спалюванні обов'язкового використання додаткового висококалорійного палива для «підсвічування».

Поведено розрахунки енергоефективності спалювання ТПВ без додаткового просушення ТПВ та з додатковим просушуванням ТПВ за європейською методикою, яка розміщена у Додатку II Директиви 2008/98 / ЄС про Відходи:

$$E = \frac{E_p - (E_f + E_i)}{0,97 \times (E_w + E_f)} \quad (3)$$

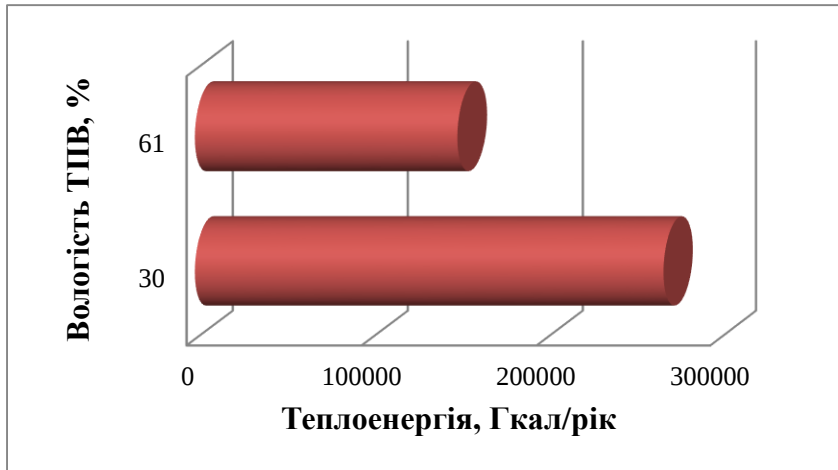
де E_p – це річна енергія, вироблена у вигляді тепла або електроенергії, ГДж/рік; E_f – річний об'єм додаткового палива, витраченого на виробництво енергії, ГДж/рік; E_w – річна енергія, що міститься у відпрацьованих відходах, розрахована з урахуванням їх теплоти згорання, ГДж/рік; E_i – імпортована енергія, що отримується від зовнішнього постачальника, ГДж/рік; 0,97 – коефіцієнт, що враховує втрати енергії внаслідок утворення золи та у навколишнє середовище.

З економічної та екологічної точки зору енергетична ефективність процесу спалювання ТПВ повинна складати 0,60 - 0,65 (60 – 65 %).

У таблиці 3 представлені результати розрахунку енергоефективності спалювання ТПВ на сміттєспалювальному заводі «Енергія» без додаткового просушування ТПВ та з додатковим просушуванням ТПВ.

Таблиця 3 – Результати розрахунку енергоефективності спалювання ТПВ без додаткового просушування ТПВ та з додатковим просушуванням ТПВ

Умови поводження з відходами	Показник E , %	Кількість теплової енергії, Гкал/рік	Використання додаткового палива для підтримання процесу горіння
E без додаткового просушення ТПВ (при вологості ТПВ 61 %)	67	150 000	Використовується додаткове імпортне енергетичне паливо, природний газ
E з додатковим просушенням ТПВ (при вологості ТПВ 30 %)	71	268115	Без використання природного газу



Встановлено, що за допомогою додаткового просушування ТПВ з 61 % до 30 % вологості можна збільшити енергоефективність спалювання ТПВ на 4% та виробництво теплової енергії майже вдвічі з 150000 Гкал/рік до 268115 Гкал/рік.

Рисунок 9 – Кількість виробленої теплової енергії на рік в залежності від вологості ТПВ

Розроблено математичну модель залежності енергоефективності спалювання ТПВ від вологості ТПВ:

$$E = \frac{\sum Q(W^p) - (B_{\text{ум.п.}}(W^p) + E_i)}{0,97 \times (\sum Q_{\text{ТПВ}}(W^p) + (B_{\text{ум.п.}}(W^p)))} \quad (4)$$

де $\sum Q(W^p)$ – річна енергія, вироблена у вигляді тепла або електроенергії, в залежності від вологи ТПВ; $B_{\text{ум.п.}}(W^p)$ – річний об'єм додаткового палива, витраченого на виробництво енергії, в залежності від вологи ТПВ; $\sum Q_{\text{ТПВ}}(W^p)$ – енергія ТПВ в залежності від вологи ТПВ.

Річна енергія, вироблена у вигляді тепла або електроенергії, в залежності від вологи ТПВ:

$$\sum Q = (B_{\text{ТПВ}} \times (Q_{\text{н(ТПВ1)}}^p \times \frac{1-W^p}{1-W_1^p}) + B_{\text{ум.п.}} \times Q_{\text{н(ум.п)}}^p) \times \eta \quad (5)$$

де $B_{\text{ТПВ}}$ – витрата твердих побутових відходів, кг/год (ккал/рік); $Q_{\text{н(ум.п)}}^p$ – теплота згоряння енергетичного палива, яке використовується для стабілізації процесу горіння, ккал/кг; η – коефіцієнти корисної дії для сміттєспалювального котла.

Енергія ТПВ в залежності від вологи ТПВ:

$$\sum Q_{\text{ТПВ}} = B_{\text{ТПВ}} \times (Q_{\text{н(ТПВ1)}}^p \times \frac{1-W^p}{1-W_1^p}) \quad (6)$$

Річний об'єм додаткового палива, витраченого на виробництво енергії, в залежності від вологи ТПВ:

$$B_{\text{ум.п.}} = \frac{Q_{\text{н(сум)}}^p - (Q_{\text{н(ТПВ1)}}^p \times \frac{1-W^p}{1-W_1^p})}{Q_{\text{н(ум.п)}}^p - (Q_{\text{н(ТПВ1)}}^p \times \frac{1-W^p}{1-W_1^p})} \times \frac{B_{\text{ТПВ}}}{\eta} \quad (7)$$

де $Q_{\text{н(сум)}}^p$ – теплота згоряння суміші традиційного палива та ТПВ, ккал/кг.

Теплота згоряння суміші традиційного палива та ТПВ:

$$Q_{\text{н(сум)}}^p = Q_{\text{н(ум.п)}}^p \times g + (Q_{\text{н(ТПВ1)}}^p \times \frac{1-W^p}{1-W_1^p}) \times (1 - g) \quad (8)$$

де g – масова частка одного з палив у суміші, в даному випадку – це частка умовного палива, яке використовуються для стабілізації процесу горіння побутових відходів у сміттєспалювальному котлі.

У **ЧЕТВЕРТОМУ РОЗДІЛІ** визначено термін окупності впровадження системи зменшення вологості у бункерному приміщенні на сміттєспалювальному заводі «Енергія». Визначено, що за умови, якщо вся теплова енергія (268115 Гкал) буде продана споживачам, то реконструкція бункерного приміщення та монтаж вентилятора майже відразу себе окупить ($T = 0,0005$).

За умови, що вологість відходів становитиме 30 %, що дозволить збільшити теплотворну здатність ТПВ майже вдвічі відповідно до таблиці 2, з 955 ккал/кг до 1714 ккал/кг, та отримати річні надходження від продажу теплової енергії становитимуть 363518360,45 грн.

Проаналізовано Європейські директиви 75/442/ЄС про відходи, 2000/76/ЄС про спалювання відходів, 2009/28/ЄС про енергію з відновлюваних джерел, та встановлено наступні принципи управління відходами в ЄС:

- відходи повинні бути спалені, якщо вони не підлягають переробці або повторному використанню;
- вдосконалення технологій остаточної утилізації (сміттєспалювальні заводи);
- стимулювання виробництва енергії з відновлювальних джерел енергії, наприклад, відходів.

Вищенаведені принципи управління відходами в ЄС відповідають меті магістерської дисертації.

Встановлено, що кількість викидів шкідливих речовин під час спалювання ТПВ збільшується з підвищенням вмісту води у ТПВ. На рисунках 10, 11 та 12 зображено викиди вуглекислого газу (CO_2), викиди оксиду вуглецю (CO) та вуглеводнів (HC) відповідно від спалювання ТПВ в залежності від вмісту води (ВВ) у відходах. В таблицях 4, 5 та 6 представлено пікові значення викидів CO_2 , CO та HC відповідно в залежності від вмісту води у ТПВ.

Таблиця 4 – Пікові значення викидів CO_2 в залежності від вмісту води у ТПВ

Час, хв	Температура, °C	Двоокис вуглецю (CO_2), %		
		ВВ 65 %	ВВ 45 %	ВВ 25 %
30	437	16.2	9.8	6.5
40	554	22.6	13.8	11.4
50	643	24.4	15.1	13.3
60	720	21.9	13.1	10.5
70	802	16.4	10.3	8.9

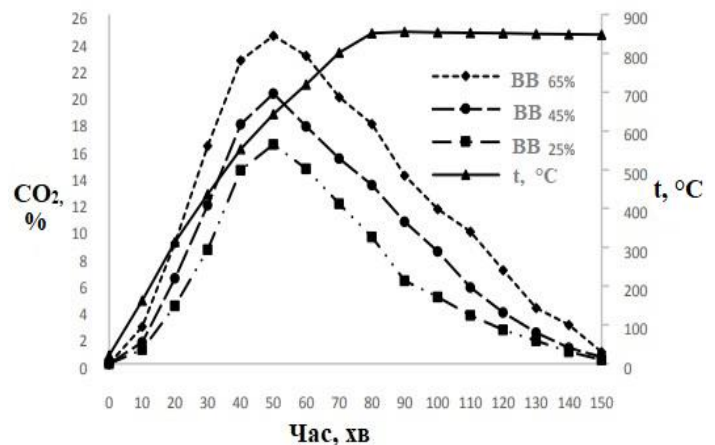


Рисунок 10 – Залежність кількості викидів CO_2 від вмісту води у відходах

Таблиця 5 – Пікові значення викидів
СО в залежності від вмісту води у
ТПВ

Час, хв	Темпера- тура, °С	Оксид вуглецю (СО), ppm		
		ВВ 65 %	ВВ 45 %	ВВ 25 %
40	554	12.6	10.3	8.2
50	643	14.8	12.7	9.4
60	720	15.4	11.7	9.8
70	802	13.2	10.2	8.1
80	852	11.8	8.2	6.9

Таблиця 6 – Пікові значення викидів
НС в залежності від вмісту води у
ТПВ

Час, хв	Темпера- тура, °С	Вуглеводні (НС), ppm		
		ВВ 65 %	ВВ 45 %	ВВ 25 %
40	554	1382	1121	875
50	643	1673	1372	1159
60	720	1779	1482	1324
70	802	1667	1373	1245
80	852	1498	1224	1086

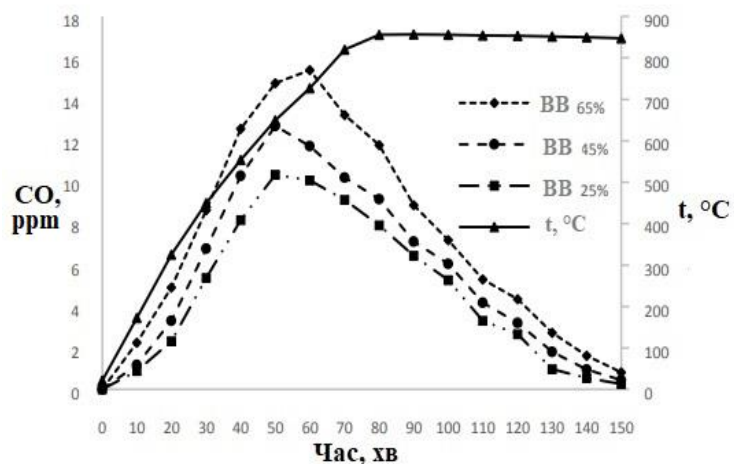


Рисунок 11 – Залежність кількості викидів
СО від вмісту води у відходах

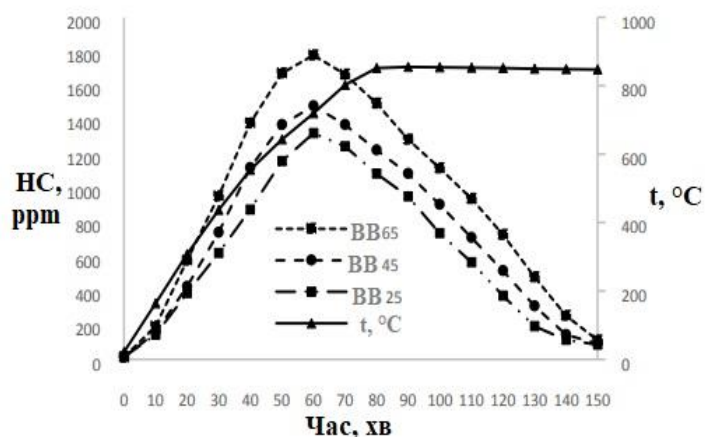


Рисунок 12 – Залежність кількості викидів
НС від вмісту води у відходах

Визначено вплив води ТПВ на утворення золи після їх спалювання. Білий або сіро-коричневий колір свідчать, що в золі залишився низький відсоток вуглецю. Чорна зола свідчить про високий відсоток вуглецю, що залишився в золі, та вказує на те, що спалювання не було завершено. Тобто, зола є індикатором ефективності спалювання ТПВ. Зола, що містить шлак, скло та частково незгорілі органічні речовини, як правило, грубопіщана за зовнішнім виглядом. На рисунку 13 зображено зразки утвореної золи після спалювання ТПВ з вмістом води 65, 45 та 25 %.

Як видно з рисунку 13, зола після спалювання відходів з низьким вмістом води 25 – 30 % має сіро-коричневий колір та не має крупних фракцій, що є індикаторами «якісної» золи. Ці індикатори вказують на те, що зола має низький вміст вуглецю та процес спалювання був завершений.

Зола після спалювання відходів з вмістом води 45 – 50 % має темно-сірий – чорний колір та піщана з крупними фракціями, що вказує на достатньо високий вміст вуглецю та незавершений процес спалювання.

Зола після спалювання відходів з вмістом води 65 – 70 % має майже чорний колір та з високим вмістом крупних фракцій, що свідчить про високий вміст вуглецю та незавершений процес спалювання.

Встановлено, що після спалювання відходів з високим вмістом води утворюється зола чорного кольору з крупними фракціями, що вказує на незавершений процес спалювання та високий вміст вуглецю у відходах.

Після спалювання відходів з низьким вмістом води утворюється зола білого та сіро-коричневого кольору без крупних фракцій, за зовнішнім виглядом як пісок, що вказує на завершений процес спалювання та низький вміст вуглецю у відходах.

Розраховано кількість викидів забруднюючих речовин та парникових газів в атмосферу при спалюванні природного газу, який використовується для підсушування ТПВ та підтримання процесу горіння у топці на сміттєспалювальному заводі «Енергія», результати розрахунків представлені у таблиці 7.

Таблиця 4.4 – Результати розрахунків викидів забруднюючих речовин та парникових газів в атмосферу при спалюванні природного газу на сміттєспалювальному заводі «Енергія»

Речовина	Валовий викид, т
Оксиди азоту (NO_x)	0,17
Оксид вуглецю (CO)	0,66
Діоксид вуглецю (CO_2)	155,5
Оксид азоту (N_2O)	0,0003
Метан (CH_4)	0,003

Обґрунтовано екологічний ефект від впровадження системи зменшення вологості ТПВ:

– встановлено, що під час спалювання відходів з низькою вологістю (25 -30 %) виділяється менше шкідливих речовин;

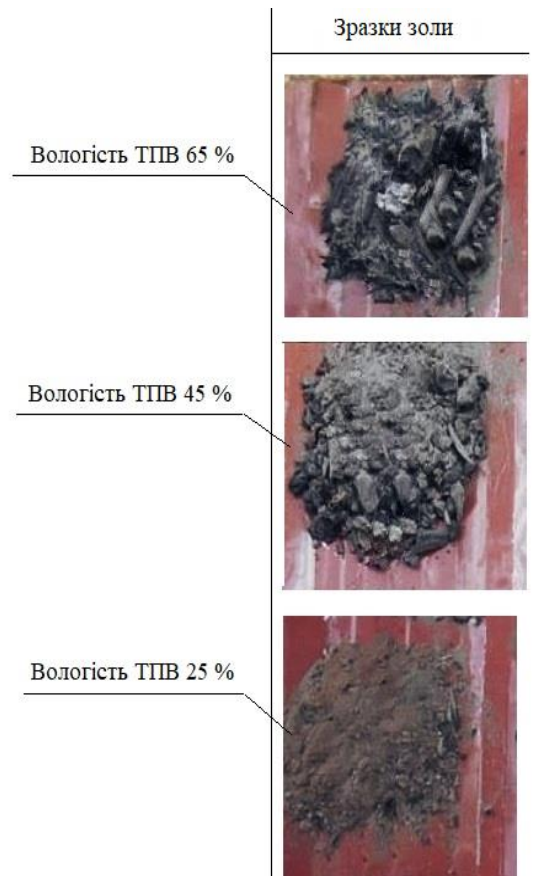


Рисунок 13 – Зразки утвореної золи після спалювання ТПВ з вмістом води 65, 45 та 25 %

- встановлено, що після спалювання відходів з низькою вологістю (25 – 30 %) зола має сірий колір, що свідчить про низький вміст вуглецю в ній та завершений процес спалювання;
- встановлено, що за допомогою підсушування відходів можна відмовитись від використання природного газу, тим самим зменшити викиди забруднюючих речовин та парникових газів.

ВИСНОВКИ

Дисертація є закінченою науково-дослідною роботою, в якій вирішена актуальна нова наукова задача із удосконалення технології поводження з ТПВ перед їх спалюванням для підвищення енергоефективності спалювання відходів, що є важливим для подальшого розвитку енергозберігаючих технологій на сміттєспалювальних заводах.

Основні наукові і практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Встановлено, що зі збільшенням вологості, зольності (вміст негорючої частини ТПВ) прямо пропорційно знижується теплота згоряння ТПВ, а відповідно, і теплоефективність.
2. За алгоритмом оптимального багатокритеріального вибору визначено раціональний спосіб термічної утилізації ТПВ – пряме спалювання.
3. Визначено домінантні чинники, які впливають на енергоефективність спалювання ТПВ: обсяг ТПВ, який спалюється, т/добу; кількість виробленої пари з ТПВ, МВт-год/1 т ТПВ; чутливість до вологості ТПВ.
4. Визначені домінантні чинники, за яких досягається стабільний та високий рівень теплотворної здатності ТПВ на Базельському сміттєспалювальному заводі:
 - змішування ТПВ у бункері;
 - підсушування та насичення повітрям відходів за рахунок потоків повітря від вентилятора, який встановлений у бункерному приміщенні;
 - відсіювання сухіших відходів потоками повітря від вентилятора в іншій частині бункера, з подальшим завантаженням їх у топку;
 - повітря, яке необхідне для горіння та стабілізації температури у камері згоряння, збирається з бункерного приміщення вентилятором, утилізуючи неприємний запах.
5. Визначено загальний недолік у процесі підготовки ТПВ для спалювання на сміттєспалювальному заводі «Енергія» – відсутність системи підсушування відходів, що суттєво впливає на їх теплотворну здатність.
6. Розроблено схему вдосконалення бункерного приміщення на ПАТ «Київенерго» Філіал «Завод "Енергія"» з метою зменшення вмісту вологи у ТПВ та підвищення їх теплотворної здатності.

7. Встановлена залежність теплоти згоряння ТПВ від вологості. Зафіксовано збільшення теплоти згоряння ТПВ майже вдвічі з 979 ккал/кг до 2204 ккал/кг від вологості з 61 % до 30% для умов ПАТ «Київенерго» Філіал «Завод "Енергія"».

8. Встановлена залежність енергоефективності спалювання ТПВ від вологості ТПВ. Зафіксовано підвищення енергоефективності спалювання ТПВ для умов ПАТ «Київенерго» Філіал «Завод "Енергія"» на 4 % за допомогою додаткового просушування ТПВ з 61 % до 30 % вологості ТПВ та виробництво теплової енергії майже вдвічі з 150000 Гкал/рік до 268115 Гкал/рік відповідно.

9. Розроблено методику розрахунку енергоефективності спалювання ТПВ в залежності від вологості.

10. Річний економічний ефект від продажу теплової енергії (за умови, якщо буде продана вся згенерована тепла енергія 268115 Гкал) при теплотворній здатності ТПВ 1714 ккал/кг становитиме 363518360,45 грн.

11. Визначено, що за умови, якщо вся тепла енергія (268115 Гкал) буде продана споживачам, то реконструкція бункерного приміщення та монтаж вентилятора майже відразу себе окупить ($T = 0,0005$).

12. Обґрунтовано екологічний ефект від впровадження системи зменшення вологості ТПВ:

- встановлено, що під час спалювання відходів з низькою вологістю (25 -30 %) виділяється менше шкідливих речовин;

- встановлено, що після спалювання відходів з низькою вологістю (25 – 30 %) зола має сірий колір, що свідчить про низький вміст вуглецю в ній та завершений процес спалювання;

- встановлено, що за допомогою підсушування відходів можна відмовитись від використання природного газу, тим самим зменшити викиди забруднюючих речовин та парникових газів (розраховано валові викиди під час спалювання природного газу на заводі «Енергія»: 0,17 т оксидів азоту, 0,66 т оксиду вуглецю, 155,5 т діоксиду вуглецю, 0,0003 т оксиду азоту, 0,003 т метану).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Шабельник І. Ю. Вплив виробничої діяльності сміттєспалювального заводу «Енергія» на навколишнє середовище / І. Ю. Шабельник, М. І. Сергієнко. Тези V науково-технічної конференції (з участю студентів) «Енергетика. Екологія. Людина», 24 – 26 жовтня 2012 року. – Київ: Основа, 2012. – С. 33–35.

Здобувачем визначено вплив виробничої діяльності сміттєспалювального заводу на навколишнє середовище.

2. Шабельник І. Ю. Аналіз впливу морфологічних властивостей твердих побутових відходів на їх теплотворну здатність / І. Ю. Шабельник. тези доповідей

ХІІ Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів, присвяченої пам'яті професора Я. І. Мовчана (з міжнародною участю), 19 квітня 2018 року. – Київ: НАУ, 2018. – С. 98–99.

Здобувачем визначено вплив морфологічних властивостей ТПВ на їх теплотворну здатність.

АНОТАЦІЯ

Шабельник І. Ю. Підвищення ефективності спалювання твердих побутових відходів шляхом їх попереднього спущення. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня магістра за спеціальністю 101 – Екологія. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2018.

Робота направлена на удосконалення технології поводження з відходами перед їх спалюванням шляхом впровадження системи зменшення вологості та їх спущення.

За алгоритмом оптимального багатокритеріального вибору визначено раціональний спосіб термічної утилізації ТПВ – пряме спалювання.

Запропоновано та розроблено схему вдосконалення бункерного приміщення з метою зменшення вологості ТПВ для умов України.

В результаті роботи встановлено залежність теплоти згоряння ТПВ від вологості, що дозволило оцінити енергоефективність спалювання ТПВ. Встановлено збільшення теплотворної здатності ТПВ від 979 ккал/кг до 2204 ккал/кг при вологості 60 % та 10 % відповідно для умов ПАТ «Київенерго» Філіал «Завод "Енергія"».

Встановлено залежність енергоефективності спалювання ТПВ від вологості. Зафіксовано підвищення енергоефективності спалювання ТПВ для умов ПАТ «Київенерго» Філіал «Завод "Енергія"» на 4 % за допомогою додаткового просушування ТПВ з 61 % до 30 % вологості ТПВ та виробництво теплової енергії майже вдвічі з 150000 Гкал/рік до 268115 Гкал/рік відповідно.

Розроблено методику розрахунку енергоефективності спалювання ТПВ в залежності від вологості.

Ключові слова: ТПВ, спалювання, теплотворна здатність, вологість ТПВ, сміттєспалювальний завод, енергоефективність, теплоенергія.

АННОТАЦИЯ

Шабельник И. Ю. – Повышение эффективности сжигания твердых бытовых отходов путем их предварительного опущения. – На правах рукописи

Диссертация на соискание степени магистра по специальности 101 – Экология. Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» МОН Украины, Киев, 2018.

Работа направлена на усовершенствование технологии обращения с отходами перед их сжиганием путем внедрения системы уменьшения влажности и их спущения.

По алгоритму оптимального многокритериального выбора определен рациональный способ термической утилизации ТБО – прямое сжигание.

Предложена и разработана схема совершенствования бункерного помещения с целью уменьшения влажности ТБО для условий Украины.

В результате работы установлена зависимость теплоты сгорания ТБО от влажности, что позволило оценить энергоэффективность сжигания ТБО. Установлено увеличение теплотворной способности ТБО от 979 ккал/кг до 2204 ккал/кг при влажности 60% и 10% соответственно для условий ПАО «Киевэнерго» Филиал «Завод "Энергия"».

Установлена зависимость энергоэффективности сжигания ТБО от влажности. Зафиксировано повышение энергоэффективности сжигания ТБО для условий ПАО «Киевэнерго» Филиал «Завод "Энергия"» на 4% за счет дополнительного просушивания ТБО с 61% до 30% влажности ТБО и производство тепловой энергии почти вдвое с 150000 Гкал/год до 268115 Гкал/год соответственно.

Разработана методика расчета энергоэффективности сжигания ТБО в зависимости от влажности.

Ключевые слова: ТБО, сжигание, теплотворная способность, влажность ТБО, мусоросжигательный завод, энергоэффективность, тепловая энергия.

ABSTRACT

I. Shabelnyk. Increasing the energy efficiency of the combustion process of the MSW by their preliminary fluffing. – Manuscript.

Thesis for a Master's degree, specialty 101 – Ecology. – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2018.

The thesis is aimed at improving technology for waste treatment before combustion by the implementation of a system for reducing the waste moisture and the waste fluffing.

According to the algorithm of optimal multi-criteria choice, a rational method for thermal utilization of MSW is defined – direct combustion.

A scheme for improving the bunker room was proposed and developed with the aim of reducing the MSW moisture for the conditions of Ukraine.

The dependence of the heat combustion of MSW on humidity was established. That allowed to estimate the energy efficiency of the MSW incineration. Increasing of the MSW combustion heat from 979 kcal/kg to 2204 kcal/kg to MSW moisture from 61 % to 30 % for conditions Plant "Energia" is fixed.

The dependence of the energy efficiency of MSW combustion on waste moisture is determined. Increasing of energy efficiency of the MSW combustion for the conditions of Plant "Energia " for 4% using additional drying of the MSW from 61% to 30% of the MSW moisture content and increasing of the heat production from 150000 Gcal/year to 268115 Gcal /year are fixed

The mathematical model for determining the energy efficiency of the MSW combustion depending on the MSW moisture is developed.

Key words: MSW, combustion, calorific value, humidity of waste, waste incineration plant, energy efficiency, heat energy.

Шабельник Ілона Юріївна

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СПАЛЮВАННЯ ТВЕРДИХ
ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ ШЛЯХОМ ЇХ ПОПЕРЕДНЬОГО СПУШЕННЯ**

Спеціальність 101 – Екологія

(Автореферат)