НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ

МАГЄРА ЮРІЙ МИХАЙЛОВИЧ

УДК 33.013.6

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕРМІЧНОЇ ІНСІНЕРАЦІЇ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.
Роботу виконано в Інституті технічної теплофізики
Національної академії наук України, м. Київ.

Науковий керівник: кандидат технічних наук,
СІГАЛ Олександр Ісакович,
Інститут технічної теплофізики НАН України,
завідувач лабораторії теплофізичних процесів у котлоагрегатах

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник,
ВОЛЬЧИН Ігор Альбінович,
Інститут вугільних енерготехнологій НАН України,
заступник директора з наукової роботи

кандидат технічних наук,
СМІХУЛА Анатолій Володимирович,
Інститут газу НАН України,
заступник директора з наукових питань

Захист відбудеться 18 грудня 2019 р. о 10.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.224.01 в Інституті технічної теплофізики НАН України за адресою: 03057, м. Київ, вул. М.Капніст, 2а.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інституту технічної теплофізики НАН України за адресою: 03057, м. Київ, вул. М.Капніст, 2а.

Автореферат розіслано 14 листопада 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д 26.224.01,
доктор технічних наук Ж.О. Петрова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. За останні десятиріччя технологія спалювання твердих побутових відходів (ТПВ) в світі досягла значного розповсюдження. Так, на теперішний час тільки в країнах ЄС працює близько 520 сміттєспалювальних заводів, які утилізують більше 100 млн. т ТПВ щорічно, одночасно виробляючи теплову та електричну енергію. В Україні працює тільки один сміттєспалювальний завод «Енергія», розташований у м. Київ.

Спалювання ТПВ має великий потенціал заміщення природного газу. Так, для м. Київ, яке продукує 1,2 млн. т ТПВ щорічно, даний потенціал становить 280 млн. $м^3$ в рік.

Також треба зазначити, що при обсязі утворення ТПВ в Україні близько 13 млн. т в рік, тільки 1,9% їх обсягу утилізується за допомогою спалювання, а 98% утилізуються на полігонах, забруднюючи ґрунт і води, що не відповідає вимогам Європейської директиви 2008/98/ЄС щодо досягнення показника утилізації не менше 65% від загальної кількості відходів і 10% допустимого захоронення відходів. Це означає, що для України стоїть завдання радикально підвищити ступінь утилізації і гостро постає проблема підвищення ефективності спалювання ТПВ.

Однак, в умовах України технологія спалювання ТПВ має ряд істотних особливостей, пов'язаних з низькою і нестабільною теплотою згоряння ТПВ, що зумовлено як морфологічним складом самих ТПВ, так і специфікою системи їх збору. Це призводить до необхідності використання додаткового палива для підтримання температурних умов спалювання, які необхідні для забезпечення належних екологічних показників.

З огляду на це, для оцінки перспектив використання ТПВ як можливого палива для виробництва теплової і електричної енергії на ТЕЦ необхідні розробки, що комплексно розглядають спалювання ТПВ з технологічної та екологічної точок зору. Так, потрібні рішення щодо визначення елементного складу ТПВ та теплоти, яка виділяється при їх спалюванні. Значення останньої необхідно, зокрема, при вирішенні проблеми мінімізації витрати додаткового палива для підсвічування. Важливим є також завдання визначення раціональних режимів спалювання ТПВ, при дотриманні яких забезпечується висока економічна та екологічна ефективність процесу їх інсінерцаії. Вказане зумовлює високу актуальність роботи.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основні результати дисертаційної роботи одержано при виконанні науково-дослідної роботи № 1.7.1.873 «Розроблення методів і обладнання для підвищення енергоекологічних характеристик котлоагрегатів комунальної енергетики потужністю 3,15-30 МВт відповідно до вимог Директив ЄС» (№ДР 0115U002605), що виконується за постановою борю ВФТЕ НАНУ, протокол №13§70 від 30.09.2014 р, та госп. договору №438 від 26.10.2017 «Аналіз існуючого стану очищення димових газів від забруднюючих

речовин на сміттєспалювальному заводі «Енергія», що виконувався на замовлення Інституту вугільних енерготехнологій НАН України.

Мета і задачі дослідження

Мета роботи - підвищення енергетичної ефективності спалювання твердих побутових відходів з низькою і нестабільною теплотою згоряння шляхом зниження витрати природного газу на підсвічування та вибору раціональних режимів роботи обладнання за умови дотримання вимог екологічної безпеки.

Для досягнення цієї мети вирішенню підлягали такі завдання:

- розробити технологію і лабораторний стенд для експериментального дослідження процесу спалювання ТПВ;
- експериментально визначити теплоту згоряння ТПВ з морфологічним складом і вологістю, характерними для міст України, із застосуванням лабораторного котла-калориметра;
- розробити методичний підхід до визначення основних параметрів процесу спалювання ТПВ за умов наявності та відсутності використання додаткового палива для підсвічування;
- визначити раціональні значення технологічних параметрів процесу спалювання ТПВ (коефіцієнту надлишку повітря, температури повітря на горіння та питомої витрати природного газу для підсвічування);
- розробити систему моніторингу параметрів процесу спалювання ТПВ для визначення вмісту основних горючих елементів ТПВ та забезпечення можливості оперативного реагування на зміну тепловиділення при їх спалюванні.

Об'єкт дослідження – процес спалювання ТПВ з низькою і нестабільною теплотою згоряння в лабораторному котлі-калориметрі.

Предмет дослідження – теплотехнічні характеристики та показники ефективності процесу спалювання ТПВ.

Методи дослідження.

В роботі використані розрахункові та експериментальні методи досліджень. При розробленні розрахункової моделі для побудови матеріальних і теплових балансів процесів спалювання ТПВ використані методи статистичного опрацювання даних, реалізовані в складі стандартних пакетів MS Excel і MathCad.

Експериментальні методи використані при інструментальних вимірах параметрів роботи лабораторного котла-калориметра під час проведення досліджень з визначення теплоти згоряння ТПВ.

Наукова новизна отриманих результатів

1. Вперше розроблено спосіб визначення теплоти Q згоряння ТПВ із застосуванням котла-калориметра.
2. Вперше визначено діапазони значень теплоти згоряння ТПВ з морфологічним складом і вологістю, характерними для м. Києва, для весняного, літнього, осіннього та зимового сезонів .

3. Вперше запропоновано розрахунково-експериментальний підхід до визначення основних теплотехнічних характеристик процесу спалювання ТПВ.

4. Вперше для ТПВ з теплотою згоряння від 6900 кДж/кг до 5230 кДж/кг на основі отриманих рівнянь регресії визначено необхідні витрати природного газу на підсвічування. Для типових значень коефіцієнта надлишку повітря і температури його підігріву стосовно умов сміттєспалювального заводу «Енергія» встановлено, що при Q=6900 кДж/кг вказана підсвітка може бути відсутня, а при Q=5230 кДж/кг має становити 0,08 $м^3$/кг ТПВ.

5. Вперше для умов сміттєспалювального заводу встановлено закономірності впливу витрати повітря і температури його підігріву на температурний стан топкового простору.

6. Вперше розроблено алгоритм та відповідне програмне забезпечення для управління величиною витрат природного газу на підсвічування в котлах-інсінераторах в режимі реального часу на основі опрацювання даних вимірювання концентрації основних компонентів продуктів згоряння і витрати повітря на горіння.

Практична цінність отриманих результатів дисертаційної роботи полягає в наступному.

Створено спосіб для прямого визначення тепловиділення при спалюванні ТПВ з використанням котла-калориметра. Одержані значення теплоти згоряння ТПВ можуть бути покладено в основу попередньої оцінки технологічних параметрів процесу їх спалювання, а відтак, створення алгоритмів автоматичного керування тепловими характеристиками обладнання зі спалювання ТПВ.

Розроблена розрахункова модель дозволяє визначати кількість природного газу, необхідного для підсвічування при спалюванні ТПВ з низькою теплотою згоряння. На основі цієї моделі може проводитися оцінка економічної доцільності будівництва ТЕЦ на ТПВ в різних регіонах України з урахуванням морфології ТПВ, вартості природного газу та собівартості енергоресурсів.

Експериментальні та розрахункові дослідження виконано для умов сміттєспалювального заводу «Енергія» в м. Київ. Застосування заходів, запропонованих в роботі, дозволило знизити використання природного газу.

Особистий внесок здобувача.

Принципові і основні результати дисертації отримані автором особисто. Автором самостійно проведено аналіз стану проблеми, розроблено ідею і тему дисертації, обґрунтовано методики експериментальних досліджень, виконано аналіз отриманих даних, сформульовано висновки.

В роботах, опублікованих у співавторстві, пошукачеві належить участь у постановці задач дослідження і проведення експериментів.

Апробація результатів дисертаційної роботи

Основні наукові положення й результати дисертаційної роботи обговорювалися на XXVI та XXVII міжнародних конференціях «Проблеми екології і експлуатації об'єктів енергетики» (Одеса, 2016 -2017 р.); X Міжнародній конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики» (Київ, Інститут технічної теплофізики НАН України, 2017), Міжнародному конгресі виставці «Екологія. Теплопостачання. Енергозбереження. Водопостачання. Каналізація» (м. Чорноморськ, 2019), а також на наукових семінарах відділу теплофізичних проблем систем теплопостачання в ІТТФ НАН України.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються, базувалися на використанні загальноприйнятих методик і порівнянні отриманих даних з результатами інших досліджень.

Публікації

Основні наукові положення дисертаційної роботи опубліковано в 7-ми наукових працях, у тому числі 6 статтях у спеціалізованих фахових виданнях, з яких 1 входить до наукометричної бази даних SCOPUS, а також в 1 учбовому посібнику.

Структура і об'єм дисертації. Дисертаційна робота містить вступ, чотири розділи, висновки, перелік використаних джерел та додатки. Основна частина дисертації викладена на 139 сторінках, включаючи 35 ілюстрацій, 16 таблиць, перелік використаних джерел з 122 найменувань, додатки на 21 сторінці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та задачі дисертаційної роботи, методи дослідження, наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, наведено інформацію про апробацію роботи, публікації, приведені основні результати і положення, що виносяться на захист.

Розділ 1. Аналітичний огляд технологій спалювання твердих побутових відходів. Технологія спалювання ТПВ на даний час є дуже поширеною в світі серед інших технологій їх термічної переробки. За результатами аналізу встановлено, що для національних умов спалювання практично несортованих ТПВ з мінімальною їх підготовкою є найбільш доцільним і економічно обґрунтованим способом термічної утилізації ТПВ.

Значний науково-практичний інтерес має дослідження роботи обладнання зі спалювання ТПВ в нерозрахункових умовах. Однією з найбільших проблем при спалюванні ТПВ є низькі значення теплоти згоряння. При зменшенні теплоти згоряння вихідних ТПВ у порівнянні з розрахунковими умовами може з'являтися необхідність в спалюванні значних обсягів додаткового висококалорійного палива (зазвичай

природного газу), що істотно погіршує техніко-економічні показники підприємства зі спалювання ТПВ, і тому на практиці дуже важливо визначити технологічні параметри, які дозволять мінімізувати витрати природного газу або забезпечити стійке горіння та повне спалювання ТПВ з низькими теплотами згоряння.

В результаті аналізу існуючих методів визначення теплоти згоряння ТПВ зроблено висновок про необхідність розроблення методики прямого визначення теплоти згоряння ТПВ. Наявність двох методів – прямого і прогнозного – дозволить проводити періодичну перевірку точності прогнозного визначення теплоти згоряння ТПВ.

Екологічні аспекти спалювання ТПВ на колосникових решітках в світі відпрацьовані на високому рівні. Найважливішим аспектом дотримання як технологічних, так і екологічних вимог є підтримання температури в топковому просторі на рівні не менше 850°С при перебуванні ТПВ в цій зоні не менше 2 секунд. З цієї точки зору необхідним є створення розрахункової методики для складання матеріальних і теплових балансів, що дозволить розглядати процес спалювання ТПВ як самостійно, так і спільно з додатковим паливом.

Обґрунтовано, що за допомогою такої розрахункової методики можливо дослідити вплив таких характеристик процесу, як склад і теплота згоряння ТПВ та коефіцієнт надлишку повітря на необхідність та обсяг спалювання додаткового палива для досягнення необхідного температурного рівня, а також встановити залежності, що дозволять для конкретних умов визначити можливість спалювання ТПВ без додаткового палива і, якщо можливе, то визначити раціональні технологічні параметри процесу.

Одним з проблемних питань аналізу ефективності технології спалювання ТПВ є те, що у загальному випадку у кожний момент часу теплота згоряння ТПВ є невідомою. Отже необхідно розробити систему діагностики, що дозволить визначати вміст горючих елементів та теплоту згоряння ТПВ в залежності від складу продуктів згоряння, що залишають котел-інсінератор, а також відпрацювати можливість визначення рівня енергоефективності процесу спалювання ТПВ, який можна оцінити як питому витрату ТПВ або умовного палива на виробку одиниці енергії та виробництва енергоносіїв на базі розрахункової обробки в реальному часі результатів роботи системи моніторингу.

Розділ 2. Основні методики проведення досліджень. Для вирішення задач, пов’язаних з дослідженням умов спалювання ТПВ та визначенням їх теплоти згоряння, була створена експериментальна лабораторна установка (рисунок 1), а також розроблена відповідна методика проведення експериментів.

Відповідно до методики визначено перелік вимірюваних величин (таблиця 1), підібрано комплект контрольно-вимірювальних приладів,

сформовано перелік компонентів для складання модельних наважок ТПВ та визначені всі необхідні дії з підготовки модельної наважки.

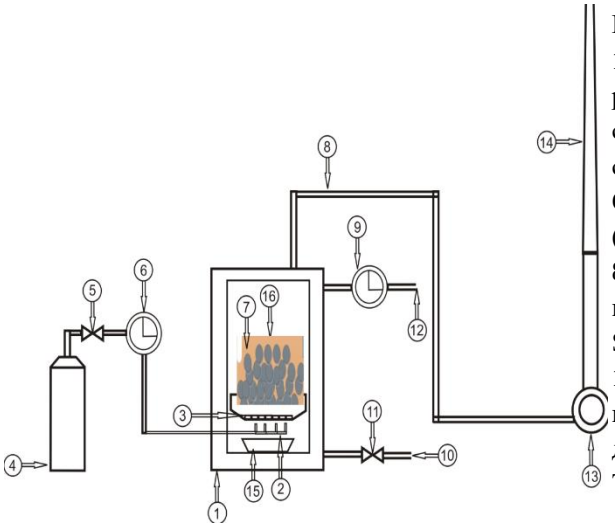

Рис. 1 Експериментальна лабораторна установка
1 – котел-калориметр; 2 - пальник газовий подовий; 3 - решітка колосникова; 4 - балон з пропан-бутановою сумішшю; 5 - редуктор-регулятор подачі пропан-бутанової суміші; 6 - лічильник газовий мембранний Gross MGM-UA G4; 7 - термопара контролю температури в камері згоряння (ТХА-1489) та модуль реєстрації сигналів «Triton 6004TC»; 8 - точка контролю температури, витрати та складу продуктів згоряння; 9 - ультразвуковий лічильник теплоти Sharky 775 DN 20 Qn 2,5; 10 - патрубок подачі води в котел; 11 - регулятор подачі води; 12 - патрубок відводу води з котла; 13 – димосос і шибер-регулятор відхідних газів; 14 - димова труба; 15 - ємність з водою для зволоження наважки ТПВ; 16 - наважка ТПВ.

Таблиця 1 – Перелік вимірюваних параметрів

№№	Параметри, що вимірюються
1	Вага наважки ТПВ, $P_{ТПВ}$, *кг*
2	Витрата газу *B*, $м^3/год$
3	Витрата води *G*, $м^3/год$
4	Температура теплоносія на вході $t_{вх}$, $^0 C$
5	Температура теплоносія на виході $t_{вих}$, $^0 C$
6	Вага зольного залишку $P_{золи}$, *кг*
7	Кількість води, що залишилася у ємності з водою, яка розміщена під пальником $P_{води}$, *кг*
8	Концентрація основних компонентів в продуктах згоряння, *%*
9	Витрата продуктів згоряння, $м^3/с$
10	Температура продуктів згоряння, *°C*

Складено набір розрахункових залежностей, за допомогою яких, використовуючи в якості аргументів показання контрольно-вимірювальних приладів, можна визначити шукану величину – теплоту згоряння ТПВ:

$$Q_{вид} = (Q_1 + Q_2 + Q^{пари} + Q_3 + Q_5 + Q_6) \cdot \frac{100}{100 - q_4} \qquad (1)$$

де:

$Q_{вид}$ – теплота, що виділилась при спалюванні ТПВ (та додаткового палива при його використанні), кДж;

Q_1 – кількість теплоти, що сприймається охолоджувальним контуром в процесі експерименту, кДж;

Q_2 – втрати теплоти з димовими газами, що відходять від котла, кДж;

$Q^{пари}$ – втрати теплоти на випаровування вологи наважки ТПВ, кДж;

Q_3 – втрати теплоти з хімічним недопалом, кДж;

q_4 – відносні втрати теплоти від механічного недопалу, %

Q_5 – втрати теплоти від охолодження поверхні котла, кДж;

Q_6 – втрати теплоти з фізичною теплотою шлаку, кДж.

При використанні газу в якості палива для підсвічування, теплота від його спалювання $Q_г$, яка розраховується з його обсягу, що вимірюється газовим

лічильником, з урахуванням теплотворної здатності, віднімається від величини отриманої в експерименті кількості теплоти.

Теплота спалювання ТПВ розраховується як відношення кількості теплоти, що виділяється при згорянні наважки ТПВ, до ваги наважки ТПВ:

$$Q_{нр}^{ТПВ} = \frac{Q_{вид} - Q_г}{P} \qquad (2)$$

де: P – вага наважки з урахуванням внесеної вологи, кг.

Для поглибленого дослідження процесу спалювання ТПВ розроблено розрахункову модель. Основним завданням розрахункової моделі є дослідження теплових аспектів спалювання ТПВ в топці котла шляхом побудови теплового балансу. Відомо, що одним з допоміжних елементів побудови теплового балансу є розгляд матеріального балансу. Оскільки необхідно передбачити можливість вивчення спалювання як окремо ТПВ, так і ТПВ спільно з природним газом, розрахункова модель представлена чотирма блоками: матеріальний баланс горіння ТПВ, матеріальний баланс горіння природного газу, матеріальний баланс спільного горіння ТПВ та природного газу, тепловий баланс процесу (рисунок 2).

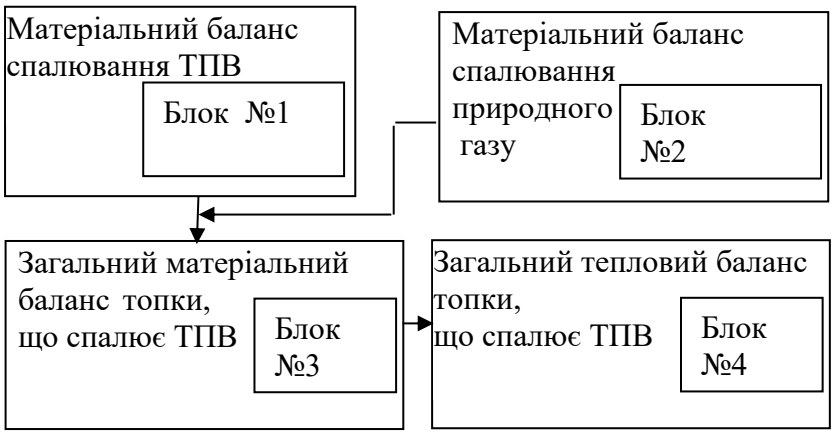

Рисунок 2. Схема елементів розрахункової моделі спалювання ТПВ

В елементному складі ТПВ окрім стандартних для твердого палива елементів містяться такі елементи як хлор (0,7-1% на горючу масу), фтор, ртуть. Сумарна частка цих компонентів в робочій масі складе не більше 0,5% і їх неврахування може призвести до приблизно такої ж похибки матеріального балансу. Що стосується теплового балансу, то похибка буде ще менше. Крім того, на даний час в Україні існує проблема несанкціонованого відбору пластикових пляшок та упаковки з ТПВ, а в подальшому вміст пластику в ТПВ на горіння буде ще зменшуватись у зв'язку з перспективою побудови сортувальних заводів.

Тому в основі побудови матеріального балансу горіння ТПВ лежить використання стандартних залежностей розрахунку горіння твердого палива. При цьому базова методика вдосконалена за рахунок складання нових залежностей:

– для визначення частки незгорілого вуглецю при заданій частці механічного недопалу (q_4, %): $\Delta C_{нед} = \frac{Q_{нр}^{ТПВ} \cdot q_4}{33400}$,

де: $Q_{нр}^{ТПВ}$ – теплота згоряння ТПВ, розрахована для його робочого складу, кДж/кг; 33400 – теплота згоряння вуглецю, кДж/кг;

– для визначення виходу вуглекислого газу і кисню в продуктах згоряння на 1 кг ТПВ з урахуванням механічного недопалу:

$$V_{CO2}^{ТПВ} = 0.0187 \cdot (C_т^р - \Delta C_{нед});$$

$$V_{O2}^{ТПВ} = k_{O2} \cdot (\alpha - 1) \cdot \frac{V_{O2\,теор}^{ТПВ}}{k_{O2}} + 0.0187 \cdot \Delta C_{нед},$$

де: α – коефіцієнт надлишку повітря; k_{O2} –доля кисню в сухому повітрі; $V_{O2\,теор}^{ТПВ}$ – теоретично необхідна для спалення 1 кг ТПВ кількість кисню, кг/кг; $C_т^р$ – вміст вуглецю в робочій масі ТПВ, %.

Складання матеріального балансу горіння природного газу виконується з використанням стандартних залежностей з теорії горіння палива. Для складання загального матеріального балансу топки при спільному спалюванні ТПВ та природного газу використовуються результати, отримані за допомогою 1-го і 2-го розрахункових блоків. В основі виконання даної процедури лежить визначення кількості і складу продуктів згоряння при заданій частці природного газу ξ, яка показує, скільки метрів кубічних природного газу вводиться на 1 кг ТПВ. Тобто для визначення об'єму кожного з компонентів продуктів згоряння використовується залежність наступного типу:

$$V_к = V_к^{ТПВ} + \xi \cdot V_к^{ПГ},$$

де: $V_к^{ТПВ}$, $V_к^{ПГ}$ – об'єми заданого компоненту, що формуються при спалюванні 1кг ТПВ та 1 м^3 природного газу відповідно, м^3/кг та м^3/м^3.

Складання загального теплового балансу топки, що спалює ТПВ, проводиться урівноваження загального теплового балансу топки за рахунок визначення калориметричної температури з використанням ітераційної процедури:

$$t_{кал} = \frac{Q_{нр}^{ТПВ} \cdot (1 - q_4/100) + \xi \cdot Q_{нр}^{ПГ}}{0{,}01 \cdot (\%CO_2 \cdot c_{CO2}(t_{кал}) + \%H_2O \cdot c_{H2O}(t_{кал}) + \%O_2 \cdot c_{O2}(t_{кал}) + \%N_2 \cdot c_{N2}(t_{кал}) + \%SO_2 \cdot c_{SO2}(t_{кал}))},$$

де: $\%CO_2$, $\%H_2O$, $\%O_2$, $\%N_2$, $\%SO_2$ – відсотковий вміст відповідних компонентів в продуктах згоряння, %;

$c_{CO2}(t)$, $c_{H2O}(t)$, $c_{O2}(t)$, $c_{N2}(t)$, $c_{SO2}(t)$ – теплоємності відповідних компонентів продуктів згоряння, обчислені для заданого значення температури, кДж/(м^3·К);

$Q_{нр}^{ТПВ}$ – нижча теплота згоряння ТПВ, кДж/кг;

$Q_{нр}^{ПГ}$ – нижча теплота згоряння природного газу, кДж/м^3.

Необхідність проведення ітерацій викликана тим, що шукана величина входить у вираз для свого визначення як аргумент для обчислення теплоємностей компонентів продуктів згоряння.

Для автоматизації розрахункової процедури по визначенню $t_{кал}$ і дійсної температури в топці в сучасному інженерно-обчислювальному

пакеті оброблені відповідні табличні дані та отримані рівняння регресії, що описують залежність об'ємних теплоємностей азоту, кисню, вуглекислого газу і водяної пари від температури.

Для майбутнього вдосконалення розробленої розрахункової моделі і знаходження з її допомогою додаткових резервів для оптимізації процесу спалювання за рахунок видалення частини вологи ТПВ в проміжному бункері і використання газів бродіння, передбачена можливість включення в модель додаткових блоків. Їх зміст відпрацьовано на концептуальному блоці і завершено розробкою шаблонів розрахункових виразів.

Схема використання блоків розрахункової моделі для визначення необхідної частки додаткового палива представлена наступним алгоритмом:

1. Виконується розрахунок самостійного горіння ТПВ (Блок №1);
2. Визначаються калориметрична і дійсна температури горіння (Блок №4);
3. Отримана дійсна температура порівнюється з рекомендованим діапазоном 850-900 °С. У разі якщо вона потрапляє в зазначений діапазон, то в спалюванні додаткового палива немає необхідності. Якщо вона вища (що дуже малоймовірно) необхідно збільшити значення коефіцієнта надлишку повітря. Якщо отримана дійсна температура менше 850 °С, необхідно спалювання додаткового палива;
4. Виконується розрахунок матеріального балансу горіння природного газу (Блок №2);
5. Зводиться загальний матеріальний баланс спільного горіння ТПВ та природного газу з попередньо заданим значенням частки природного газу ξ (Блок 3);
6. Визначаються калориметрична і дійсна температури горіння (Блок №4);
7. Отримана дійсна температура порівнюється з рекомендованим діапазоном 850-900 °С. У разі, коли вона не входить в цей діапазон, відбувається повернення на третій блок, де коригується значення ξ.

Сукупність кроків 5-7 повторюється до тих пір, поки дійсна температура в топці не ввійде в заданий діапазон.

Розділ 3. Дослідження процесів спалювання ТПВ. При складанні модельних наважок використані статистичні дані про вміст основних компонентів в ТПВ в м. Києві в весняні, літні, осінні та зимові сезони 2016 р. Для кожного сезону складалося по дві партії наважок: одна з максимально можливим реальним рівнем вологості, друга з рівнем вологості в повітряно-сухому стані.

Для літніх місяців при повітряно-сухому стані (вологість 28,6 %) встановлене експериментально питоме тепловиділення знаходиться в межах 7100-7200 кДж/кг ТПВ, а для наважок в зволоженому стані (вологість 57,4%) тепловиділення складає 4450-5000 кДж/кг ТПВ. Для зволожених

наважок отримані експериментально значення теплоти згоряння задовільно кореспондуються з прогнозними розрахунковими даними, отриманими для використаного складу ТПВ (різниця складає не більше 10%), а для наважок в повітряно-сухому стані різниця експериментально встановленого і прогнозного значення теплоти згоряння не перевищує 15%. Відповідні дані отримано для всіх досліджених сезонів.

Досліджено динаміку зміни температури в топці котла-калориметра при спалюванні модельних наважок. На рисунку 3 проілюстровано випадок спалювання наважки з рівнем вологості 57,4% з використанням додаткового палива.

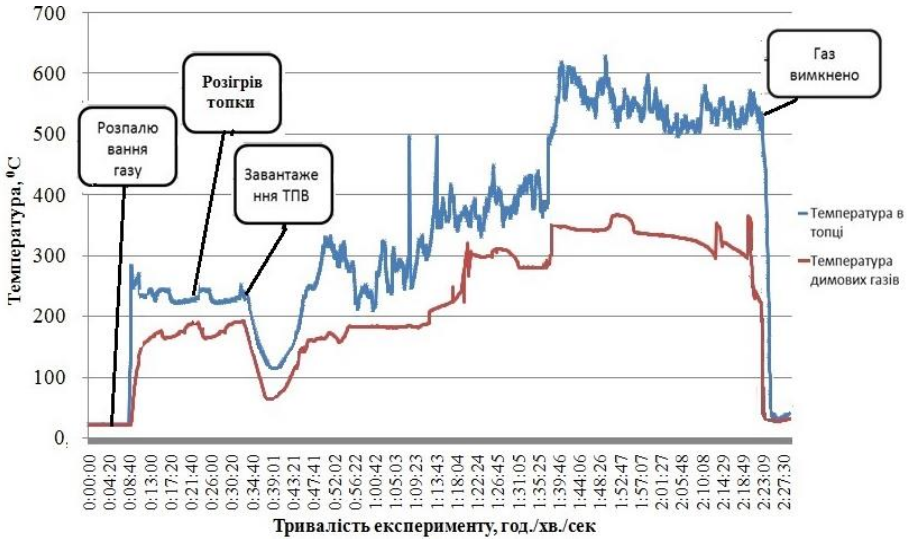

Рисунок 3. Динаміка зміни температури в топці котла та температури димових газів при спалюванні наважки ТПВ заданого морфологічного складу та вологості, з газом для підсвічування

Реалізувати спалювання ТПВ без додаткового палива навіть в повітряно-сухому стані на базі експериментального котла-калориметра не вдалося, хоча з точки зору діаграми Таннера для використаного складу ТПВ в повітряно-сухому стані це можливо. Такий результат вказує на залежність можливості реалізації автогоріння від технології спалювання і відповідних специфічних технічних можливостей обладнання, зокрема достатньої теплової інерції котла, температури підігріву повітря тощо. На підставі результатів, отриманих при спалюванні наважок ТПВ в котлі-калориметрі, можна зробити висновок, що розроблений метод дозволяє експериментально визначати теплоти згоряння наважок ТПВ, проте він не дозволяє адекватно моделювати умови спалювання ТПВ при використанні промислового обладнання.

Для досягнення адекватності опису досліджуваного процесу спалювання ТПВ за допомогою розробленої моделі в конкретних умовах необхідно провести процедуру її адаптації. Для вирішення цього завдання використано процедуру початкового підстроювання. При цьому приведення у відповідність результатів виміру і розрахунку одного з найважливіших параметрів процесу спалювання ТПВ (температури в топковому просторі) досягається за рахунок корекції значення адаптаційного коефіцієнта. Тобто для характерних режимів експлуатації підбирається таке значення $k_{адапт}$,

щоб розрахункове значення температури в топці відповідало дійсному значенню 850 °С.

Певні значення $k_{адапт}$ в повній мірі відповідають тільки тому об'єкту і режимам експлуатації, для яких вони були отримані. Зокрема, для спалювання ТПВ величина $k_{адапт}$ залежить від теплового навантаження котла-утилізатора і знижується з її збільшенням. Адаптація створеної в дисертаційній роботі розрахункової моделі проведена для умов заводу «Енергія»: для проектних умов експлуатації значення $k_{адапт}$ становить 0,735. Визначення $k_{адапт}$ для інших умов експлуатації котла-утилізатора, який спалює ТПВ (менші теплоти згоряння ТПВ і більш низькі теплові навантаження котла) показали діапазон зміни $k_{адапт}$ від 0,735 до 0,9.

Одним з основних напрямків використання розробленої розрахункової моделі є визначення необхідних витрат додаткового палива при спалюванні ТПВ з низькою теплотою згоряння.

В результаті виконання розрахунків для умов заводу «Енергія» встановлено необхідні питомі витрати природного газу на підсвічування для стабілізації температурного стану в топці на рівні 850 °С для теплот згоряння ТПВ нижче 6900 кДж/кг. При зміні теплоти згоряння ТПВ від 6900 кДж/кг до 5230 кДж/кг при коефіцієнті надлишку повітря 2,23 і температурі підігрівання повітря 180 °С питома витрата додаткового природного газу майже лінійно змінюється від 0 до 0,08 м^3/кг (рис. 4).

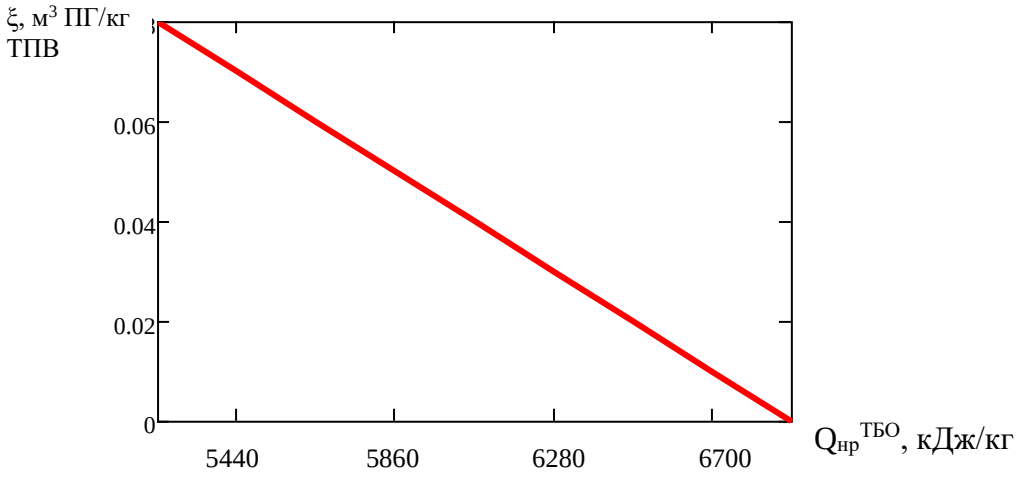

Рисунок 4. Залежність питомої витрати природного газу на підсвічування від теплоти згоряння ТПВ

Шляхом проведення низки чисельних експериментів і аналізу їх результатів показано високий ступінь впливу коефіцієнта надлишку повітря на температурний стан топки при інших рівних умовах. Так, в результаті проведення чисельних експериментів встановлено, що (при знятті обмеження на максимальне значення температури в топковому просторі) при теплоті згоряння ТПВ 6900 кДж/кг при температурі підігріву повітря 180 °С зміна коефіцієнта надлишку повітря від 2,23 до 1,7 призводить до підвищення температури в топці від 850 до 990 °С.

Аналогічним чином обґрунтовано високий ступінь впливу температури підігріву повітря на процес спалювання ТПВ. Для теплоти згоряння ТПВ 6900 кДж/кг встановлено, що при зміні температур підігріву повітря від 20 до 380 °С раціональні значення коефіцієнта надлишку повітря, при яких буде забезпечений заданий температурний рівень в топці (850 °С) змінюються від 1,87 до 2,62 по залежності, близькій до лінійної (рис. 5).

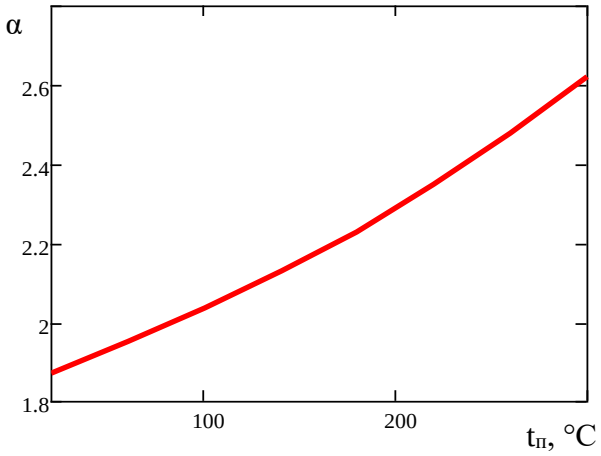

Рисунок 5. Залежність раціонального значення коефіцієнту надлишку повітря від температури підігріву повітря при теплоті згоряння ТПВ 6900 кДж/кг

Отримано дві серії рівнянь регресії для номінального теплового навантаження котла, що спалює ТПВ, ($k_{адапт}$ = 0,735) і стійкого зниженого навантаження ($k_{адапт}$ = 0,9), які встановлюють:

- необхідні теплоти згоряння ТПВ ($Q_{нр}$) для забезпечення заданого температурного рівня в топці для заданих значень коефіцієнта надлишку повітря (α) і температури підігріву повітря ($t_п$);

- необхідні температури підігріву повітря для забезпечення заданого температурного рівня в топці при заданих значеннях коефіцієнта надлишку повітря і теплоти згоряння ТПВ;

- необхідного коефіцієнта надлишку повітря для забезпечення заданого температурного рівня в топці при заданих значеннях температури підігріву повітря і теплоти згоряння ТПВ (рис. 6).

Для значення $k_{пір}$=0,735 маємо наступні рівняння регресії:

– $Q_{нр} = -130800 - 82{,}673 \cdot \alpha \cdot t_п + 0.055 \cdot t_п^2 + 114{,}244 \cdot t_п - 140300 \cdot \alpha + 42140 \cdot \alpha^2$,

рівняння справедливе для $2 \le \alpha \le 2{,}3$ та $120 \le t_п \le 320°C$;

– $t_п = -765{,}491 + 0.018 \cdot \alpha \cdot Q_{нр} - 2.229 \cdot 10^{-8} \cdot Q_{нр}^2 - 0.071 \cdot Q_{нр} + 1071 \cdot \alpha - 193{,}75 \cdot \alpha^2$,

рівняння справедливе для $2 \le \alpha \le 2{,}3$ та $7000 \le Q_{нр} \le 12000 кДж/кг$;

– $\alpha = 1{,}04 + 7{,}107 \cdot 10^{-8} \cdot Q_{нр} \cdot t_п + 4{,}013 \cdot 10^{-10} \cdot Q_{нр}^2 + 5{,}28 \cdot 10^{-5} \cdot Q_{нр} + 4{,}647 \cdot 10^{-4} \cdot t_п + 1{,}9 \cdot 10^{-6} \cdot t_п^2$,

рівняння справедливе для $20 \le t_п \le 320°C$ та $7000 \le Q_{нр} \le 12000$ кДж/кг.

Для значення $k_{пір}$=0,9 маємо наступні рівняння регресії:

– $Q_{нр} = -6533 - 40.431 \cdot \alpha \cdot t_п + 0.041 \cdot t_п^2 + 51.159 \cdot t_п + 991.214 \cdot \alpha + 3422 \cdot \alpha^2$,

рівняння справедливе для $2 \le \alpha \le 2{,}33$ та $20 \le t_п \le 340°C$;

– $t_п = -1086 + 0.022 \cdot \alpha \cdot Q_{нр} + 4.402 \cdot 10^{-6} \cdot Q_{нр}^2 - 0.155 \cdot Q_{нр} + 1398 \cdot \alpha - 266.667 \cdot \alpha^2$,

рівняння справедливе для $2{,}1 \le \alpha \le 2{,}3$ та $5000 \le Q_{нр} \le 9500$ кДж/кг;

– $\alpha = 0{,}825 + 1{,}279 \cdot 10^{-7} \cdot Q_{нр} \cdot t_п - 6{,}546 \cdot 10^{-9} \cdot Q_{нр}^2 + 1.916 \cdot 10^{-4} \cdot Q_{нр} + 5.038 \cdot 10^{-4} \cdot t_п + 3.781 \cdot 10^{-6} \cdot t_п^2$,

рівняння справедливе для $20 \le t_п \le 320°C$ та $5000 \le Q_{нр} \le 12000 кДж/кг$.

Отримані рівняння є корисним інструментом для визначення умов роботи топки, при яких є можливість проводити процес спалювання ТПВ без використання додаткового палива.

Перевірка адекватності всіх отриманих рівнянь регресії виконана стандартним чином. Для всіх отриманих рівнянь регресії виконується умова F <Fα (розрахункове значення критерію Фішера менше табличного), тобто з точки зору математичної статистики всі отримані рівняння є адекватними. Аналіз отриманих рівнянь і їх графічної інтерпретації також свідчить про їх відповідність логіці протікання процесу. Так, при номінальному тепловому навантаженні котла, що спалює ТПВ, а отже і топки ($k_{адапт}$ = 0,735), умови підтримання заданого температурного рівня в топці важчі, тобто за інших рівних умов необхідно мати більші значення теплоти згоряння ТПВ, або менші значення коефіцієнту надлишку повітря або більші значення температури підігріву повітря, ніж при зниженому тепловому навантаженні.

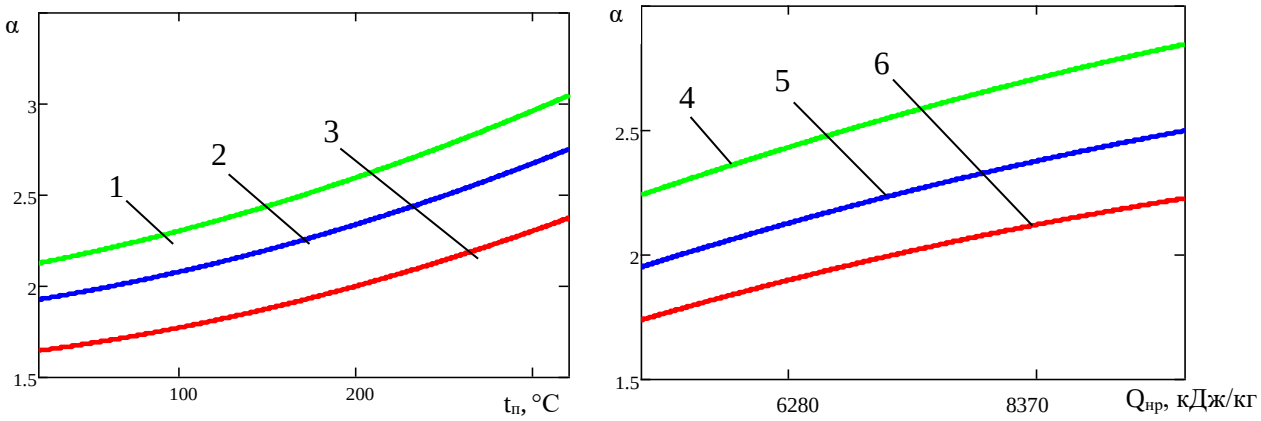

Рисунок 6. Залежність коефіцієнту надлишку повітря від теплоти згоряння ТПВ та температури підігріву повітря для значення $k_{пір}$=0.9:
а) для фіксованих значень теплоти згоряння ТПВ, кДж/кг: 1 – $Q_{нр}$=10000, 2 – $Q_{нр}$=7500, 3 – $Q_{нр}$=5000;
б) для фіксованих значень температури підігріву повітря, °С: 4 – $t_п$=280, 5 – $t_п$=180, 6 – $t_п$=80

Розділ 4. Система моніторингу спалювання ТПВ та визначення рівня енергоефективності процесу. В роботі створено алгоритм, що дозволяє в режимі реального часу з достатньою точністю визначати склад і теплоту згоряння вихідних ТПВ на підставі розрахункової обробки сигналів датчиків про витрату повітря на горіння та концентрації таких компонентів продуктів згоряння як кисень, вуглекислий газ та водяні пари, і таким чином робить можливим застосування розробок за визначенням і аналізу моментальних теплових балансів.

В основі системи діагностики лежить розгляд системи рівнянь, що встановлює зв'язок між вихідними для діагностики величинами, визначеними за допомогою інформаційно-вимірювальної системи в режимі реального часу (вміст компонентів в продуктах згоряння $\%CO_2$, $\%H_2O$, $\%O_2$ і питома витрата дуттьового повітря $V_в$, $м^3/кг$ ТПВ) і шуканими величинами

(основними компонентами робочої маси ТПВ: вуглець $C_т^р$, водень $H_т^р$ і волога $W_т^р$):

$$\%H2O = \frac{V_{H2O}}{V_{ПС}} = \frac{0.112 \cdot H_т^р + 0.0124 \cdot W_т^р + 0.001242 \cdot d_{вл}}{V_в + 0{,}056 \cdot H_т^р + 0{,}00124 \cdot W_т^р + 1.44 \cdot 10^{-4} \cdot C_т^р + 0{,}00437 \cdot C_т^р};(3)$$

$$\%O_2 = \frac{V_{O2}}{V_{ПС}} = \frac{V_в \cdot C_{O2}^{вл.в} /100 + 0.00437 \cdot C_т^р - 0.0187 \cdot (C_т^р - \Delta C_{нед}) - 0.056 \cdot H_т^р}{V_в + 0{,}056 \cdot H_т^р + 0{,}00124 \cdot W_т^р + 1.44 \cdot 10^{-4} \cdot C_т^р + 0{,}00437 \cdot C_т^р};(4)$$

$$\%CO_2 = \frac{V_{CO2}}{V_{ПС}} = \frac{0.0187 \cdot (C_т^р - \Delta C_{нед})}{V_в + 0{,}056 \cdot H_т^р + 0{,}00124 \cdot W_т^р + 1.44 \cdot 10^{-4} \cdot C_т^р + 0{,}00437 \cdot C_т^р},(5)$$

де: $C_{O2}^{вл.в.}$ – концентрація кисню в вологому повітрі, %; $d_{вл}$ – вологовміст повітря, що йде на спалювання ТПВ, г/м^3; $\Delta C_{нед}$ – величина недопалу вуглецю, %.

В дисертації досліджена параметрична чутливість моделі розробленої системи діагностики. В якості базової точки, відносно якої проводилось дослідження, обрано наступні параметри. Склад продуктів згоряння, %: CO_2=8.135; H_2O=22.129%; O_2=7.078%. Питома витрата повітря V=3,616 м^3/кг ТПВ. Склад ТПВ, %: $C_т^р$=19,874; $H_т^р$=2,662; $S_т^р$=0,177; $O_т^р$=12,421 $N_т^р$=0,355 $A_т^р$= 15,21 $W_т^р$=49,3.

Штучно по черзі задавалася похибка у заданні величин аргументів і визначалося вплив цієї похибки на результат визначення $C_т^р$, $H_т^р$, $W_т^р$ (Таблиця 2).

Таблиця 2 – Результати дослідження параметричної чутливості алгоритму діагностики процесу спалювання ТПВ

		Похибки вимірювання вихідних величин			
		$V_в$, м^3/кг (+2%)	C_{O2}, % (+5%)	C_{H2O}, % (+5%)	C_{CO2}, % (+5%)
$C_т^р$, %	абс. знач.	20,254	19,975	20,215	20,972
	віднос. пох.	1,958	0,554	1,762	5,573
$H_т^р$, %	абс. знач.	2,74	2,343	2,496	2,367
	віднос. пох.	1,972	-12,8	-7,1	-11,9
$W_т^р$, %	абс. знач.	49,851	52,418	56,059	52,272
	віднос. пох.	2,012	7,264	14,72	6,97
$Q_{нр}$, кДж/кг	абс. знач.	7062	6514	6645	6812
	віднос. пох.	1,949	-5,96	-4,07	-1,66

Встановлено, що похибки визначення концентрації різних газоподібних компонентів мають якісно однаковий вплив на шуканий вміст вуглецю, водню і вологи в робочій масі. Так, завищення показань по кожному газоподібному компоненту призводить до отримання завищених $C_т^р$ і $W_т^р$ і занижених $H_т^р$ (причому ступінь заниження є суттєвою і може сягати 12%). Цікавим є той факт, що для основного показника, важливого для роботи системи діагностики (теплоти згоряння вихідного ТПВ), помилки визначення $C_т^р$ і $W_т^р$ і занижених $H_т^р$ в деякій мірі взаємно компенсуються, і похибка визначення теплоти згоряння не перевищує 6%.

Що стосується похибки визначення витрати повітря, то завищення витрат повітря призводить до завищення всіх визначених показників. Таким чином, завищення $V_в$ призводить до завищення теплоти згоряння, а завищення $\%O_2$, $\%CO_2$, $\%H_2O$ – до заниження теплоти згоряння. При розгляді випадку із заниженими показаннями $V_в$, $C_т^р$, $W_т^р$ і $H_т^р$ отримані помилки з тими ж абсолютними значеннями і зворотними знаками.

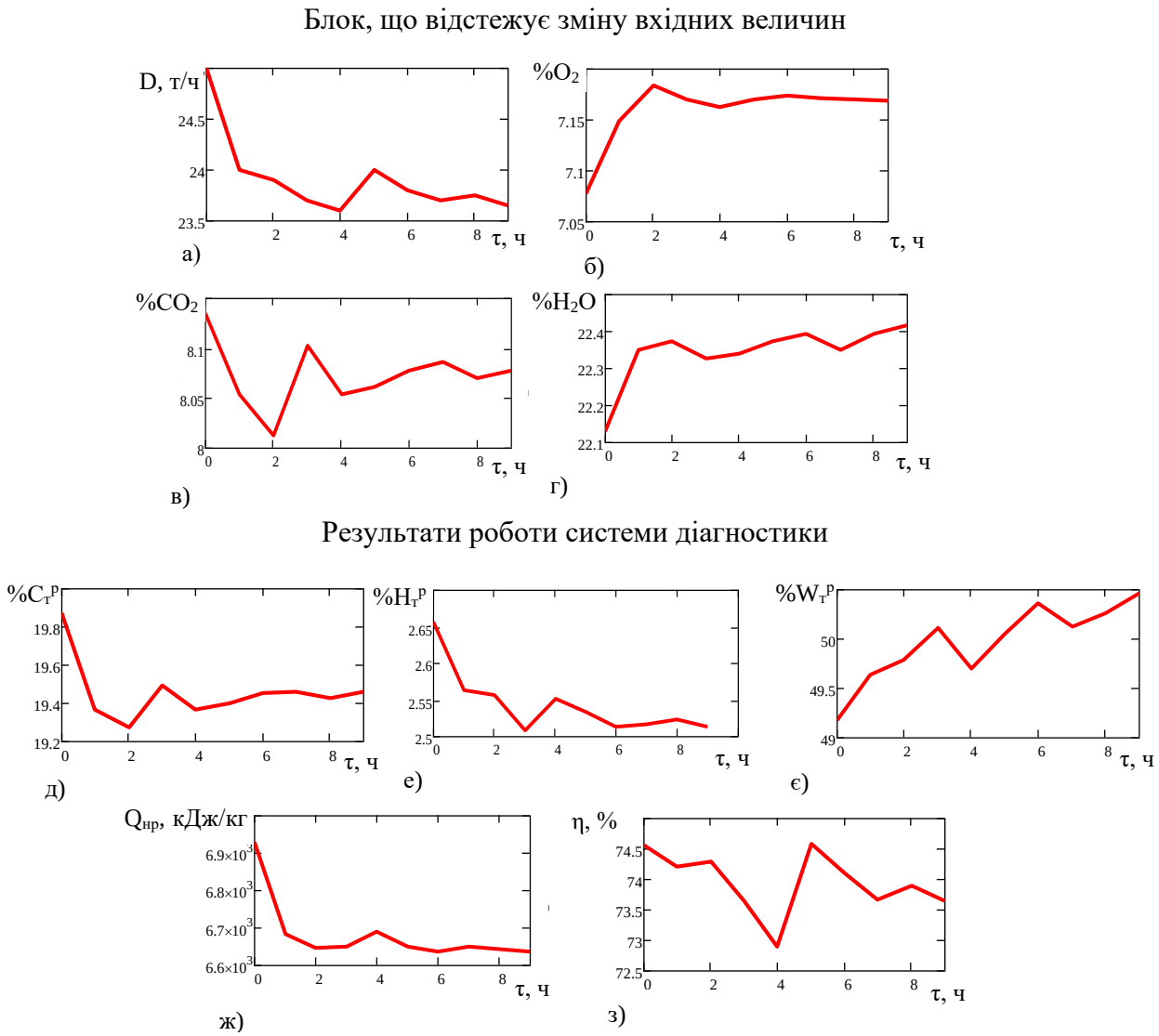

Рисунок 7. Приклад роботи системи діагностики, що дозволяє прогнозувати невідомий склад ТПВ і визначати моментальні значення к.к.д. (а - паропродуктивність котла-інсінератора; б, в, г - зміна концентрацій кисню, вуглекислого гвзу і водяної пари в продуктах згорання відповідно; д, е, є - спрогнозовані величини вмісту вуглецю, водню і вологи в робочій масі ТПВ, що надходить на спалювання; ж - прогнозоване зміна теплоти згорання ТПВ; з - зміна в часі к.к.д. котла-інсінератора

Створений підхід для прогнозування складу ТПВ є основою системи діагностики та аналізу енергоефективності роботи котла, який спалює ТПВ, оскільки наявність інформації про поточні значення теплоти згоряння дозволяє визначати моментальні значення коефіцієнту корисної дії котла:

$$\eta = \frac{D \cdot \Delta i}{G \cdot Q_{нр}},$$

де D – паропродуктивність котла, кг/с;

Δi – підвищення ентальпії робочого тіла в рамках котла, кДж/кг;

G – масова витрата ТПВ, кг/с.

Розглянуто приклад роботи системи діагностики протягом дев'яти годин. Для спрощення розрахункові дані бралися через кожну годину, а точки даних з'єднувалися прямими лініями (рис. 7).

Висновки

1. Розроблено комплекс методів і засобів, спрямованих на підвищення ефективності спалювання ТПВ з низькою і нестабільною теплотою згоряння.

2. Запропоновано спосіб визначення теплоти спалювання ТПВ шляхом спалювання їх наважки в котлі-калориметрі та створено відповідне лабораторне обладнання.

3. На основі запропонованого способу визначення теплоти згоряння ТПВ встановлено закономірності зміни її значень при варіюванні морфологічного складу протягом року. Показано, що величини теплоти згоряння для весняного, літнього, осіннього та зимового сезонів становлять 6780-7070, 7100-7200, 7300-7430 і 5110-5760 кДж/кг відповідно.

4. Розроблено розрахунково-експериментальний підхід до визначення характеристик спалювання ТПВ на основі запропонованих моделей матеріального і теплового балансу процесу та експериментальних даних щодо температурного режиму топки.

5. Із застосуванням запропонованого підходу для умов сміттєспалювального заводу «Енергія» (м. Київ) встановлено необхідні питомі витрати природного газу на підсвічування при мінімально допустимих значеннях температури відхідних газів (850 ^{0}C) для ТПВ різного морфологічного складу та режимів спалювання. Зокрема, показано, що питомі витрати природного газу практично лінійно залежать від теплоти згоряння ТПВ і змінюються від 0 до 0,08 м^3/кг ТПВ для штатних режимів спалювання.

6. Для умов відсутності використання додаткового викопного палива на підсвічування одержано дані щодо залежності температури відхідних газів від величини коефіцієнту надлишку повітря α і рівня температур $t_п$ його попереднього нагріву та встановлено діапазони раціональних значень α та $t_п$, що становлять 1,87..2,62 та 20..380 ^{0}C відповідно.

7. Побудовано рівняння регресії для номінального і середнього навантаженнь котла-інсінератора, які встановлюють залежності між теплотою згоряння ТПВ, температурою підігріву повітря на горіння та коефіцієнту його надлишку.

8. Розроблено систему моніторингу, що дозволяє в режимі реального часу визначати значення теплоти згоряння ТПВ за вмістом

компонентів продуктів згоряння та поточні потреби щодо використання природного газу на підсвічування.

9. Результати роботи впроваджено в умовах сміттєспалювального заводу «Енергія», що підтверджується листом №047/01-518 від 10.08.2017. Використання заходів, запропонованих в роботі, дозволило знизити використання природного газу відносно проектного.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Sigal A. Safyants A. Magera Y. Diagnostic system for municipal solid waste content prognosis during its combustion in the boiler. *International Journal of Energy for a Clean Environment*. USA, 2017, issue 2. P. 175-187. DOI: 10.1615/InterJEnerCleanEnv.2017022459 (Scopus) *(Внесок здобувача: участь у постановці задачі, розроблення моделі для визначення теплоти згоряння ТПВ*).
2. Y.M. Magera. Experimentally determined MSW sample incineration heat and revealing its auto-combustion capability. *Metallurgical and Mining Industry*. 2017. No 7. p. 52-57.
3. Варламов Г.Б. Магера Ю.М. Романова Е.А. Базовые теплоэнергетические установки. Экологические аспекты энергопроизводства [Текст]: учебное пособие. К.: ООО «Предприятие «ВИ ЭН ЭЙ», 2017. 278 с. ISBN 978-966-97661-5-1.
4. Магера Ю.М. Создание расчетной модели процессов сжигания твердых бытовых отходов. *Промышленная теплотехника.* 2016. Т38. №6. с 56-63.
5. Магєра Ю.М. Визначення умов, що дозволяють проводити спалювання низькокалорійного ТПВ без використання додаткового палива. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність.* Х.: НТУ «ХПІ». 2017. № 31 (1253). с 122-127.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Магера Ю.М. Павлюк Н.Ю. Створення методики експериментального визначення теплоти згоряння твердих побутових відходів. *Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика: збірник наукових праць.* Дніпро: Нова ідеологія, 2016. Випуск 8. с 130-148. *(Внесок здобувача: участь у постановці задачі, розроблення методики та вибір технічних засобів для проведення експериментальних досліджень з визначення теплоти згоряння довільної наважки ТПВ шляхом її спалення в лабораторному котлі утилізаторі*).

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

7. Колесниченко Н.В., Бурлакова Д.Е., Магера Ю.М. О путях снижения потребления природного газа в коммунальном хозяйстве Украины. *ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ. ЭНЕРГЕТИКА. ЭНЕРГОАУДИТ.* 2014. №1. С. 2-10. *(Внесок здобувача: огляд методів зниження витрат природного газу в комунальному господарстві України за рахунок використання вторинних джерел енергії, участь у постановці задачі*).

АНОТАЦІЯ

Магєра Ю.М.– **Підвищення ефективності термічної інсінерації твердих побутових відходів.** Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика, Київ, 2019.

Дисертаційна робота присвячена підвищенню ефективності спалювання твердих побутових відходів з низькою і нестабільною теплотою згоряння шляхом вибору раціональних режимів роботи обладнання за умови дотримання вимог екологічної безпеки, що призведе до зниження витрати природного газу на підсвічування.

У роботі було запропоновано спосіб визначення теплоти згоряння ТПВ шляхом спалювання їх в відповідно розробленому котлі-калориметрі.

Встановлено закономірності зміни теплоти згоряння ТПВ на основі запропонованого способу при варіюванні морфологічного складу протягом року та показано величини теплоти згоряння для чотирьох сезонів, які становлять 6780-7070, 7100-7200, 7300-7430 і 5110-5760 кДж/кг відповідно, починаючи з весіннього сезону.

Запропоновано моделі матеріального і теплового балансу процесу спалювання ТПВ. З використанням моделей було створено підхід до визначення характеристик спалювання ТПВ, що враховує експериментальні дані щодо температурного режиму топки.

Встановлено питомі витрати природного газу на підсвічування при спалюванні ТПВ різного морфологічного складу за умови дотримання мінімальної температури відхідних газів (850 ^{0}C) для сміттєспалювального заводу «Енергія» (м. Київ). Зокрема, показано, що питомі витрати природного газу практично лінійно залежать від теплоти згоряння ТПВ і змінюються від 0 до 0,08 м3/кг ТПВ.

Одержано дані щодо величини впливу температури підігріву $t_п$ повітря на горіння та коефіцієнту його надлишку α на температуру відхідних газів при умови відсутності додаткового палива на підсвічування.

Встановлено відповідні діапазони раціональних значень α та $t_п$, які дорівнюють 1,87..2,62 та 20..380 ^{0}C відповідно

Отримано дані щодо залежності між теплотою згоряння ТПВ, температурою підігріву повітря на горіння та коефіцієнту його надлишку для номінального і середнього навантаженнь котла-інсінератора, на основі яких побудовано відповідні рівняння регресії.

Розроблено систему моніторингу та відповідне програмне забезпечення, які за вмістом компонентів продуктів згоряння та статистичних даних щодо роботи котла-інсінератора дозволяють визначати значення теплоти згоряння ТПВ та потреби щодо використання природного газу на підсвічування.

Ключові слова: тверді побутові відходи, склад ТПВ, інсінерація, котел-інсінератор, теплота згоряння, додаткове паливо, ефективність інсинерації.

SUMMARY

Magera Y.M. - **Improving of the efficiency of municipal solid waste thermal incineration.** Manuscript.

Thesis for the scientific degree of “Candidate of technical sciences”, speciality 05.14.06 – “Engineering Thermal Physics and Industrial Heat-and-Power Engineering”, Kyiv, 2019.

The thesis is devoted to efficiency increasing of municipal solid waste incineration with low and unstable heat of combustion by choosing of rational modes of the equipment operation with meeting of ecological safety requirements, which will lead to reduction of natural gas consumption.

A method of determining the combustion heat of MSW by burning it in a designed boiler proposed in the work.

Variety of the MSW’s net calorific value is established on the basis of the proposed method for different morphological composition depending on the year and the values of the combustion heat for the four seasons are 6780-7070, 7100-7200, 7300-7430 and 5110-5760 kJ / kg, respectively, starting from the spring season.

Models of material and thermal balance of the MSW combustion process are proposed. An approach of determining the characteristics of MSW combustion was created based on above mentioned models, taking into account the experimental data on the temperature of the furnace.

The specific consumption of natural gas during incineration of MSW with varying morphological composition is established, the incineration plant “Energia” (Kyiv). In particular, it is shown that the specific gas consumption is almost linearly dependent on the combustion heat of the MSW and varies from 0 to 0.08 m3 / kg MSW.

The data on the magnitude of the influence of the heating temperature t_p of the air on combustion and the coefficient of its excess ratio α on the temperature of the exhaust gases are obtained. Corresponding ranges of rational values of α and t_p are established, which are equal to 1.87..2.62 and 20..380 ^{0}C, respectively.

The data on the dependence between the heat of combustion of MSW, the temperature of heating of combustion air and the coefficient of its excess for the nominal and average loads of the incinerator were obtained and the corresponding regression equations were constructed.

A monitoring system and related software have been developed that, by the content of combustion products components and statistics on the operation of the incinerator, determine the value of the combustion heat of the MSW and the need for use of natural gas for illumination.

Keywords: municipal solid waste, MSW composition, incineration, combustion heat, additional fuel, incineration efficiency.