Національна академія наук України
Інститут технічної теплофізики

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

МАГЄРА ЮРІЙ МИХАЙЛОВИЧ

УДК 33.013.6

ДИСЕРТАЦІЯ

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕРМІЧНОЇ ІНСІНЕРАЦІЇ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

05.14.06 – «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика»

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____Ю.М. Магєра

Науковий керівник - Сігал Олександр Ісакович, кандидат технічних наук

Київ – 2019

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». - Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, 2019.

За останні десятиріччя технологія спалювання твердих побутових відходів (ТПВ) в світі досягла значного розповсюдження. Наприклад, тільки в країнах ЄС працює сьогодні працює близько 520 сміттєспалювальних заводів, одночасно виробляючи теплову та електричну енергію. Але, в українських умовах термічна інсінерація твердих побутових відходів (ТПВ) має істотні особливості, пов’язані з низькою та нестабільною теплотою згоряння ТПВ. Показано, що значний науково-практичний інтерес має дослідження роботи обладнання зі спалювання ТПВ в нерозрахункових умовах. При зменшенні теплоти згоряння вхідних 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 з його мінімальним використанням при спалюванні 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.

Для вирішення задач, пов’язаних з дослідженням умов спалювання ТПВ та визначенням їх теплоти згоряння, була створена експериментальна лабораторна установка, а також розроблена відповідна методика проведення експериментів.

Відповідно до методики визначено перелік вимірюваних величин і підібрано комплект контрольно-вимірювальних приладів, сформовано перелік компонентів для складання модельних наважок ТПВ та визначені всі необхідні дії з підготовки модельної наважки.

Складено набір розрахункових залежностей, за допомогою яких, використовуючи в якості аргументів показання контрольно-вимірювальних приладів, можна визначити шукану величину – теплоту згоряння ТПВ. Таким чином, вперше розроблено спосіб визначення теплоти згоряння ТПВ із застосуванням котла-калориметра.

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 зволожених наважок отримані експериментально значення теплоти згоряння кореспондуються з прогнозними розрахунковими даними, отриманими для використаного складу ТПВ, 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. Таким чином, в дисертації вперше визначено діапазони значень теплоти згоряння ТПВ з морфологічним складом і вологістю, характерними для м. Києва, для весняного, літнього, осіннього та зимового сезонів .

Досліджено динаміку зміни температури в топці котла-калориметра при спалюванні модельних наважок. 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. На підставі цього, вперше запропоновано розрахунково-експериментальний підхід до визначення основних теплотехнічних характеристик процесу спалювання ТПВ.

Для реалізації такого підходу 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.

В основі складання загального матеріального балансу топки при спільному спалюванні ТПВ та природного газу 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.

Складання загального теплового балансу топки, що спалює ТПВ, проводиться шляхом урівноваження загального теплового балансу топки шляхом визначення калориметричної температури з використанням

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

Для досягнення адекватності опису досліджуваного процесу спалювання ТПВ за допомогою розробленої моделі в конкретних умовах необхідно провести процедуру її адаптації. 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 пірометричного 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» вперше 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.

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. Таким чином, вперше для умов сміттєспалювального заводу встановлено закономірності впливу витрати повітря і температури його підігріву на температурний стан топкового простору.

Отримано дві серії рівнянь регресії, що встановлюють взаємний зв’язок між теплотою згоряння ТПВ, температурою підігріву повітря та коефіцієнтом його надлишку, які гарантують досягнення заданого рівня температури в топці.

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.

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 $W_т^р$).

Досліджено вплив похибок визначення вхідних величин на результати діагностики, що дозволяю обирати класи точності приборів для їх вимірювання.

Таким чином, 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.

Також 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.

Ключові слова: тверді побутові відходи, термічна інсінерація, теплота згоряння, температура в топці, коефіцієнт надлишку повітря

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*).

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.

Solid waste incineration (MSW) technology has become widespread in the world over the last decades. For example, in the EU alone, there are around 520 incinerators operating today, producing both heat and electricity. In Ukrainian conditions, thermal incineration of municipal solid waste (MSW) has significant features associated with low and unstable heat of combustion of MSW. It is shown that the study of the operation of equipment for combustion of solid waste in unforeseen conditions is of considerable scientific and practical interest. With a

decrease in the heat of combustion of incoming MSW in comparison with the calculated conditions, there may be a need to burn significant amounts of additional high-calorie fuel (usually natural gas), which significantly worsens the technical and economic performance of the company burning solid waste, and therefore determination of the technological parameters that will minimize the consumption of natural gas or ensure stable combustion and complete combustion with its minimal use when burning MSW with low heat of combustion is very important.

As a result of the analysis of existing methods for determining the heat of combustion of MSW, a conclusion is made about the need to develop a method for direct determination of the heat of combustion of solid fuel. The presence of two methods — direct and predictive — will allow periodic verification of the accuracy of the predictive determination of the heat of combustion of MSW.

To solve problems related to the study of conditions of combustion of MSW and determination of their calorific value, an experimental laboratory installation was created, and an appropriate method of conducting experiments was developed.

According to the methodology, the list of measured values has been determined and a set of instrumentation has been selected, a list of components for the preparation of model weights of MSW has been formed and all necessary actions for the preparation of model weighting have been determined.

A set of calculated dependencies is compiled, which allow to determine the heat of combustion of MSW. Thus, for the first time a method for determining the heat of combustion of MSW with the use of a calorimeter boiler was developed.

In the preparation of model weights (piles), statistical data on the content of the main components in MSW in the city of Kyiv in spring, summer, autumn and winter seasons 2016 were used. Києві в весняні, літні, осінні та зимові сезони 2016 р. For each season there were two batches of piles: one with the maximum possible real level of humidity, the second with a level of humidity in the air-dry state.

For moistened samples obtained experimentally the values of the heat of combustion correspond to the forecast calculated data obtained for the used composition of MSW, and for the gaskets in the air-dry state, the difference of the experimentally established and predicted value of the heat of combustion does not exceed 15%. The relevant data were obtained for all studied seasons. Thus, the ranges of values of heat of combustion of MSW with morphological composition and humidity characteristic for m. Kiev, for spring, summer, autumn and winter seasons obtained in the thesis for the first time .

The dynamics of temperature change in the furnace of the calorimeter during the combustion of model piles is investigated. Implementation of combustion of MSW without additional fuel even in the air-dry state on the basis of experimental calorimeter boiler failed, although it is possible according to Tanner diagram for the used composition of MSW in the air-dry state. Such a result indicates the dependence of the possibility of implementing auto combustion on the combustion technology and the corresponding specific technical capabilities of the equipment, in particular, sufficient thermal inertia of the boiler, the temperature of heating of the air, etc. Based on the results obtained during the combustion of solid waste weighs in the calorimeter boiler, it can be concluded that the developed method allows to experimentally determine the heat of combustion of solid waste, but it does not allow to adequately model the conditions of combustion of MSW inside industrial equipment. Based on this, for the first time the calculation and experimental approach to determining the main thermal characteristics of the combustion process of MSW are proposed.

To implement this approach, a calculation model has been developed. The main task of the calculation model is to study the thermal aspects of combustion of MSW in the furnace of the boiler by building of a heat balance. Material balance is one of the auxiliary elements of building a heat balance. Since it is necessary to envisage the possibility of studying combustion both separately MSW and MSW together with natural gas, the calculation model is represented by four blocks: material balance of combustion of solid waste, material balance

of combustion of natural gas, material balance of joint combustion of solid waste and natural gas gas, the heat balance of the process.

At the heart of the compilation of the overall material balance of the furnace with the joint combustion of MSW and natural gas is the determination of the quantity and composition of combustion products at a given fraction of natural gas ξ, which shows how many meters of cubic natural gas is introduced per 1 kg of MSW.

The general heat balance of the furnace burning MSW is made by balancing the overall heat balance of the furnace by determining the calorimetric temperature using the iterative procedure. The need for iterations is caused by the fact that the required value is included in the expression for its definition as an argument for calculating the heat capacities of the components of the combustion products.

To achieve the adequacy of the description of the studied process of combustion of solid waste with the help of the developed model under specific conditions it is necessary to carry out the procedure of its adaptation. To solve this problem, the initial adjustment procedure is used. At the same time, the correspondence of the measurement results and calculation of one of the most important parameters of the combustion process of MSW (temperature in the furnace space) is achieved by correcting the value of the adaptation coefficient. That is selected such a value of k_{adapt}, so that the calculated value of temperature in the furnace corresponds to the actual value of 850° C.

Certain values of the k_{adapt} fully correspond only to the object and the modes of operation for which they were obtained. In particular, for the combustion of MSW, the value of the k_{adapt} depends on the heat load of the boiler operation mode and decreases with its increase. Adaptation of the calculated model created in the study is carried out for the conditions of the plant “Energia”: for the design operating conditions the value of the k_{adapt} is 0.735. Determination of the k_{adapt} for other operating conditions of the boiler that burns MSW (lower heat of

combustion of MSW and lower thermal loads of the boiler) showed a range of k_{adapt} from 0.735 to 0.9.

One of the main directions of using the developed design model is to determine the required consumption of additional fuel during combustion of MSW with low heat of combustion.

As a result of calculations for the plant “Energia” for the first time established the necessary specific consumption of natural gas for lighting to stabilize the temperature state in the furnace at 850° C for the heat of combustion of solid waste below 6900 kJ/kg. When changing the heat of combustion of MSW from 6900 kJ/kg to 5230 kJ/kg with an excess air factor of 2.23 and a heating temperature of 180° C specific consumption of additional natural gas is almost linearly varies from 0 to 0.08 m^3/kg.

By carrying out a number of numerical experiments and analyzing their results, a high degree of influence of the excess air coefficient on the temperature state of the furnace is shown under other conditions being equal. Thus, as a result of numerical experiments it was found that at the heat of combustion of MSW 6900 kJ/kg at a heating temperature of 180° C change of the excess air coefficient from 2.23 to 1.7 leads to increase in temperature in the furnace from 850 to 990° C.

Similarly, a high degree of influence of air heating temperature on the combustion process of solid waste is substantiated. For the heat of combustion of MSW 6900 kJ/kg found that when the temperature of air varies from 20 to 380° C, rational values of the excess air, which will be provided with a given temperature level in the furnace (850° C) vary from 1.87 to 2.62 in dependence, close to linear. Thus, for the first time, for the conditions of the incinerator, the regularities of the influence of the air flow and the temperature of its heating on the temperature state of the furnace space are established.

Two series of regression equations are obtained, which establish a mutual relationship between the heat of combustion of MSW, the temperature of air

heating and the coefficient of its excess, which guarantee achievement of a given temperature level in the furnace.

The obtained equations are a useful tool for determining the operating conditions of the furnace, in which it is possible to carry out the combustion process of MSW without the use of additional fuel.

Checking the adequacy of all regression equations obtained is performed in a standard way.

The algorithm is created that allows in real time with sufficient accuracy to determine the composition and heat of combustion of output MSW on the basis of the calculated processing of signals of sensors on the consumption of air for combustion and concentration of such components of combustion products as oxygen, carbon dioxide and water vapor, and thus makes it possible to use developments by definition and analysis of instant heat balances.

The diagnostic system is based on the consideration of the system of equations that establishes the relationship between the initial values for diagnostics determined by means of the information and measurement system in real time (component content in combustion products%CO_2, %H_2O, %O_2 and specific consumption of blowing air V_v, m^3/kg MSW) and the required values (the main components of the working mass of MSW: carbon C_t^r, hydrogen H_t^r and moisture W_t^r).

Influence of errors in determination of input values on results of diagnostics is investigated, which allows to choose classes of accuracy of devices for their measurement.

Thus, for the first time we developed an algorithm and appropriate software for controlling the amount of natural gas consumption for lighting in insinerators boilers in real time based on the study of measurement data of concentration of the main components of combustion products and air consumption for burning.

Also created approach to predict the composition of MSW is the basis of the system of diagnostics and analysis of energy efficiency of the boiler, which burns MSW, since the availability of information on the current values of the heat

of combustion allows to determine the instant values of the efficiency of the boiler.

Keywords: municipal solid waste, thermal insineration, heat of combustion, temperature in the furnace, coefficient of excess air

Scientific papers, in which the main scientific results of the dissertation are published:

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) *(Applicant's contribution: participation in the formulation of a problem, development of a model for determining the heat of combustion of MSW*).
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. 3. Varlamov G. Magera Yu. Romanova E. Basic heat power plants. Environmental aspects of energy production [Text]: study guide. K .: LLC “VNI AJ” LLC, 2017.278 p ISBN 978-966-97661-5-1.
4. Magera Yu. Creation of a computational model of solid waste incineration processes. Industrial heat engineering. 2016. T38. No. 6. from 56-63.
5. Magera Y. Determination of conditions that allow the burning of low-calorie MSW without the use of additional fuel. Bulletin of the National Technical University "KPI". Proceedings Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency. X .: NTU "KhPI". 2017. No. 31 (1253). pp. 122-127.

Scientific works certifying the testing of the dissertation materials:

6. Magera Yu. Pavlyuk N. Creation of a method for the experimental determination of the combustion heat of solid waste. Technical thermophysics and industrial thermal power engineering: a collection of

scientific works. Dnipro: A New Ideology, 2016. Issue 8. pp. 130-148. (*Contribution of the applicant: participation in the formulation of the problem, development of methodology and choice of technical means for carrying out experimental researches for determination of combustion heat of an arbitrary sample of MSW by its burning in a laboratory boiler utilizer*).

Scientific works, which additionally reflect the scientific results of the dissertation:

7. Kolesnichenko N., Burlakova D., Magera Yu. About ways to reduce natural gas consumption in the municipal services of Ukraine. ENERGY SAVING. ENERGY. ENERGY AUDIT. 2014. №1. Pp. 2-10. (*Contributor contribution: review of methods of reducing natural gas consumption in the utility sector of Ukraine through the use of secondary energy sources, participation in the formulation of the problem*).

ЗМІСТ

ВСТУП..... 20
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ СПАЛЮВАННЯ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ..... 26
1.1 Загальні дані про технології утилізації відходів 26
1.2 Використання технологій спалювання твердих побутових відходів для вироблення теплової та електричної енергії 29
1.3 Види технологій спалювання ТПВ 33
1.3.1 Спалювання ТПВ на колосникових решітках..... 33
1.3.2 Спалювання ТПВ у киплячому шарі 39
1.3.3. Особливості спалювання ТПВ в Європі, США та Японії 41
1.4 Теплотехнічні властивості ТПВ 42
1.6 Екологічні аспекти спалювання ТПВ 47
1.7 Дослідження енергетичної ефективності процесу спалювання ТПВ для вироблення електричної і теплової енергії 50
1.8 Проблеми на шляху поширення технології спалювання ТПВ в українських умовах..... 53
1.9 Висновки до розділу 55
1.10 Постановка мети та задач дослідження..... 56
РОЗДІЛ 2. ОСНОВНІ МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ..... 58
2.1 Методика експериментального визначення тепловиділення при спалюванні ТПВ та дослідження умов спалювання 58
2.3 Висновки до розділу 84
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ СПАЛЮВАННЯ ТПВ..... 86
3.1 Експериментальне визначення тепловиділення при спалюванні ТПВ та дослідження умов спалювання 86
3.2 Дослідження особливостей технології спалювання ТПВ за допомогою розрахункової моделі 96

3.3 Висновки до розділу 106
РОЗДІЛ 4 СИСТЕМА ДІАГНОСТИКИ СПАЛЮВАННЯ ТПВ ТА ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ 109
4.1 Створення системи діагностики для визначення теплоти згоряння ТПВ в режимі реального часу 109
4.2 Аналіз рівня енергоефективності процесу спалювання ТПВ в режимі реального часу 116
4.3 Обгрунтування вибору програмного середовища для створення емулятора системи діагностики процесів спалювання ТПВ 118
4.4 Створення емулятора системи діагностики процесів спалювання ТПВ в середовищі LabVIEW 122
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ДО РОБОТИ 124
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 126
Додаток А Технічні характеристики газового лічильника GROSS MGM-UA G4 140
Додаток Б Технічні характеристики лічильника теплоти SHARKY 775 .. 142
Додаток В Технічні характеристик хроматографа Agilent 6890 N 144
Додаток Д Технічні характеристики регістратора TRITON 6004TC 146
Додаток Ж Технічні характеристики багатофункціонального вимірювального приладу TESTO 435 149
Додаток З Технічні характеристики портативного газоаналізатора MRU Optima 7 151
Додаток К Технічні характеристики кисневого цирконієвого датчика ZFG2 152
Додаток Л Технічні характеристики газоаналізатора GM 35 154
Додаток М Вікно аналізу вхідних даних в створеному емуляторі системи діагностики 158
Додаток М Вікно аналізу вхідних даних в створеному емуляторі системи діагностики 159

Додаток Н Сполучене вікно аналізу вхідних даних та видачі результатів у створеному емуляторі системи діагностики 160
Додаток О Акт впровадження основних положень дисертаційної роботи 161

ВСТУП

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. м3 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.

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 м3/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.

Наукове значення роботи полягає в теоретичному обґрунтуванні та експериментальному визначенні умов, які дозволяють проводити спалювання ТПВ з низькою та нестабільною теплотою згоряння з мінімальним використанням додаткового палива. В роботі отримано ряд рівнянь регресії, які дозволяють визначити теплоту згоряння ТПВ $Q_{нр}$ (для заданих температури підігріву повітря $t_п$ та коефіцієнту надлишку повітря α) або температуру підігріву повітря (для заданих $Q_{нр}$ та α) або α (для заданих $Q_{нр}$ та $t_п$) таким чином, щоб забезпечити заданий температурний рівень в топці. Також важливим науковим результатом є створення основ системи діагностики, що дозволяє визначати вміст основних компонентів ТПВ (вуглець $C_т^р$, водень $H_т^р$ і волога $W_т^р$), що обумовлюють значення теплоти згоряння ТПВ, та теплоту згоряння ТПВ шляхом розрахункової обробки в реальному часі значень концентрації основних компонентів продуктів згоряння.

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 дисертації

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.

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.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ СПАЛЮВАННЯ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

1.1 Загальні дані про технології утилізації відходів

В даний час в світі неухильно зростає споживання всіх видів ресурсів, що призводить до збільшення кількості відходів, що утворюються. У зв'язку з цим питання раціональної утилізації відходів мають особливу важливість [1-3]. Стосовно твердих побутових відходів (ТПВ) можливі наступні способи їх утилізації [4]:

- захоронення відходів на полігонах;
- природні методи розкладання ТПВ (компостування);
- термічна переробка ТПВ.

Поховання на полігонах сьогодні є найбільш поширеним у світі способом утилізації відходів [5, 6]. Даний метод стосується відходів, що принципово не можуть бути спалені, і відходів, які в процесі горіння виділяють токсичні речовини. Полігон відходів ТПВ в загальному випадку не є звичайним звалищем. Сучасні полігони для утилізації - це складні інженерні споруди, оснащені системами боротьби із забрудненнями підземних вод і атмосферного повітря. Деякі полігони забезпечені обладнанням для збору і використання газів бродіння, що утворюються в процесі гниття відходів. На жаль, сьогодні це більшою мірою відноситься до європейських країн, оскільки в Україні дуже малий відсоток полігонів відповідає заданим параметрам.

Головний мінус традиційного поховання відходів полягає в тому, що навіть при використанні численних систем очищення і фільтрів цей вид утилізації не дає можливості повністю позбавитися від таких негативних ефектів розкладання відходів як гниття і ферментація, які забруднюють повітря і воду. Тому, хоча щодо інших способів утилізації, захоронення ТПВ коштує досить дешево, екологи рекомендують переробляти відходи,

зводячи до мінімуму тим самим ризики забруднення навколишнього середовища.

Компостування являє собою технологію переробки відходів, яка заснована на їх природному біорозкладенні [7-9]. З цієї причини компостування широко застосовується для переробки відходів, які мають органічне походження. Сьогодні існують технології компостування як харчових відходів, так і нерозділеного потоку ТПВ.

В Україні компостування не отримало досить широкого використання, і зазвичай воно застосовується населенням в індивідуальних будинках або на садових ділянках. Однак процес компостування також може бути централізованим і здійснюватися на спеціальних майданчиках, які представляють собою завод з переробки сміття органічного походження. Кінцевим продуктом цього процесу є компост, для якого можна знайти різні застосування в сільському господарстві.

Термічна переробка сміття (ТПВ). Оскільки побутові відходи містять досить високий відсоток органічної фракції, для переробки ТПВ досить часто застосовують термічні методи. При цьому існують такі способи термічної переробки: спалювання, низькотемпературний піроліз, високотемпературний піроліз (плазмова переробка) [10-13].

Термічна переробка сміття (ТПВ) являє собою сукупність процесів теплового впливу на відходи, необхідних для зменшення їх обсягу і маси, знешкодження шкідливих речовин, і отримання енергоносіїв та інертних матеріалів (з можливістю утилізації).

Важливими перевагами сучасних методів термічної переробки є:

- ефективне знешкодження відходів (повне знищення патогенної мікрофлори);

- зниження обсягу відходів до 10 разів;

- використання енергетичного потенціалу органічних відходів.

Серед усіх методів термічної переробки ТПВ, найбільш поширеним є спалювання [14, 15]. Основними перевагами спалювання є:

- високий рівень апробованості технологій;
- наявність спеціалізованого устаткування, що серійно випускається;
- тривалий гарантійний термін експлуатації;
- високий рівень автоматизації.

Основною тенденцією розвитку сміттєспалювання у світі є перехід від прямого спалювання відходів до оптимізованого спалювання отриманої з ТПВ паливної фракції і плавний перехід від спалювання як процесу ліквідації сміття до спалювання як процесу, який забезпечує додаткове отримання електричної та теплової енергії [16, 17].

Плазмова переробка сміття (ТПВ), по суті, являє собою не що інше як процес високотемпературного піролізу сміття [18]. Технологічна схема даного способу передбачає собою отримання з біологічної складової відходів газу, який спалюється в газових турбінах або котлах з метою отримання пара і відповідно електроенергії. Складовою частиною процесу плазмової переробки є тверді продукти у вигляді залишків або шлаку, які не піролізуються.

Явною перевагою високотемпературного піролізу є те, що дана методика дає можливість екологічно чисто переробляти і знищувати найрізноманітніші побутові відходи без необхідності їх попередньої підготовки, тобто сушки, сортування і т.д. Існує думка, що використання піролізу ТПВ на даний час вигідніше з економічної точки зору (характеризується меншим рівнем експлуатаційних витрат), ніж застосування інших, більш застарілих методик [18]. До того ж, при використанні даної технології одержуваний на виході шлак є абсолютно безпечним продуктом, і він може бути використаний згодом для самих різних цілей. Однак процеси плазмової переробки ТПВ для своєї реалізації вимагають досить складне і дороге устаткування і на даний момент не отримали широкого поширення [19].

Щодо співвідношення різних способів використання ТПВ у світі є наступні дані [20]. В США щорічно виробляється близько 230 млн. тонн

ТПВ (в середньому 760 кг на людину), близько 30% переробляється, а також проводиться компост, 15% спалюється, 55% захоронюються [5]. На рис. 1.1 представлена структуру використання ТПВ в Росії і країнах ЄС.

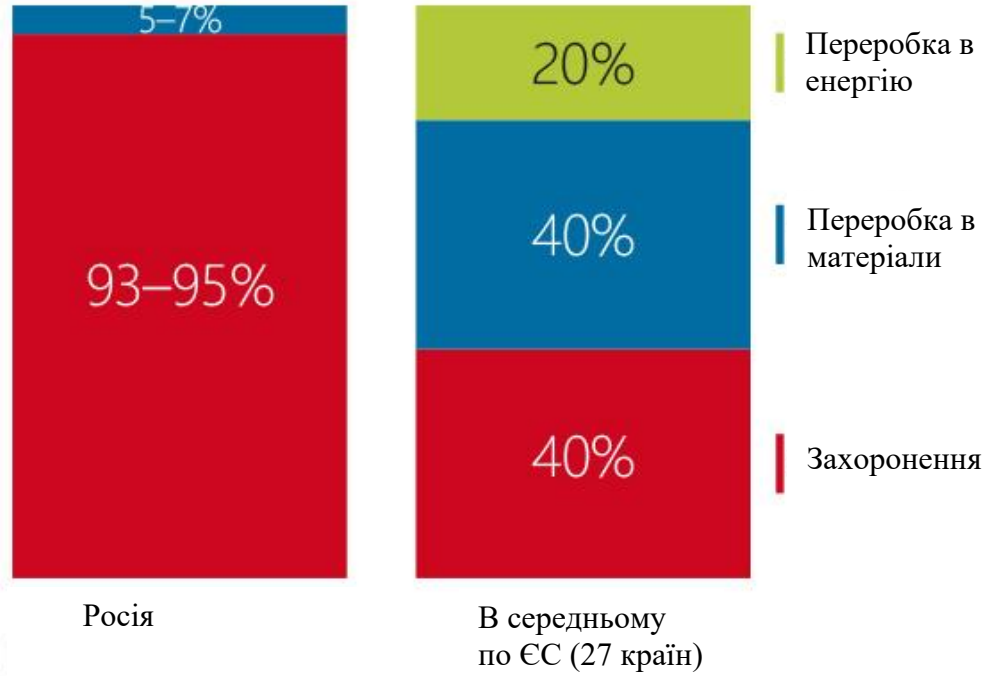


Рисунок 1.1 – Структура використання ТПВ в Росії та країнах ЄС

На даний час технологія спалювання ТПВ є дуже поширеною в світі і найпоширенішою серед інших технологій термічної переробки. В той же час в Україні існує лише одне підприємство зі спалення ТПВ [21]. Отже запровадження спалювання ТПВ є актуальною науково-технічною задачею для українського комунального господарства та енергетики.

1.2 Використання технологій спалювання твердих побутових відходів для вироблення теплової та електричної енергії

У світі досить поширена технологія спалювання твердих побутових відходів (ТПВ). Так число сміттєспалювальних заводів істотно перевищує дві тисячі [22]. До технологій термічної переробки ТПВ, які пройшли промислову апробацію, відносяться: спалювання на механічних колосникових решітках в шарових топках (в даний час в усьому світі

експлуатується більше 2 тис. установок), спалювання в киплячому шарі (близько 200 установок), спалювання в барабанних печах (приблизно 20 установок), комбіновані методи з використанням процесів піролізу і газифікації, в тому числі з плазмотронами.

Поряд із забезпеченням обробки відходів процес спалювання ТПВ знижує їх обсяг до 10% від початкового, що робить остаточне розміщення відходів менш дорогим і важким. Крім того, у багатьох країнах ТПВ та аналогічні їм промислові відходи розглядають як додаткове джерело енергії з теплотою згоряння на рівні низькосортного вугілля [23]. У зв'язку з цим в останні два десятиліття в країнах ЄС, США та Японії простежується загальна тенденція збільшення кількості заводів по термічній переробці відходів з виробленням теплової та електричної енергії (окремо або когенерація) [24]. Практично всі такі ТЕС на ТПВ належать провідним світовим енергетичним компаніям.

Вирішальними факторами, що визначають електричну потужність ТЕС на ТПВ, є прогнозована витрата відходів, що надходять на переробку, і їх властивості. Натомість електрична потужність звичайних ТЕС, на яких спалюють органічне паливо, як правило, вибирається виходячи з потреби регіону в електроенергії [25].

Кількість ТПВ, що утворюється, залежить від ряду факторів, до яких в першу чергу відносяться чисельність населення, питомі обсяги накопичення ТПВ в конкретному регіоні, а також політика регіональної влади в галузі поводження з відходами з урахуванням таких тенденцій як роздільний збір і сортування.

Важливо відзначити, що вартість енергії, виробленої при спалюванні ТПВ, є найнижчою порівняно з іншими видами нетрадиційної енергетики (рис 1.2) [26].

При такій значній кількості сміттєспалювальних заводів за кордоном, очевидно, що практичні аспекти їх експлуатації відпрацьовані досить добре. Є ряд компаній, які готові провести повний комплекс робіт по створенню

таких підприємств: від проектування до налагодження устаткування [27, 28].

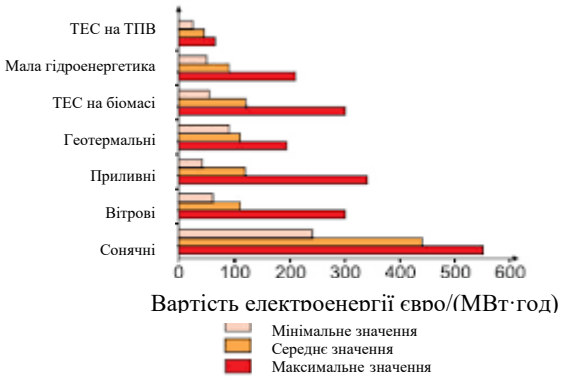


Рисунок 1.2 – Вартість енергії виробленої з використанням нетрадиційних джерел

Стан питання на пострадянському просторі

На пострадянському просторі є всього лише кілька заводів зі спалювання ТПВ. В Україні це завод «Енергія» в м. Києві, в РФ це порядку десяти заводів, серед яких можна відзначити два сміттєспалювальні заводи в м. Москві і один завод в м. Череповці [29].

У Росії і на Україні всі установки, що спалюють ТПВ, які знаходяться в експлуатації, а також об'єкти, що будуються, обладнані системою утилізації тепла з виробленням насиченої або слабо перегрітої пари, а на двох московських заводах - з виробленням електричної енергії. Хоча слід зазначити (наприклад, для умов заводу «Енергія» до 2013 р.), що в ряді випадків теплота виробленої пари просто передається в навколишнє середовище в спеціальному теплообміннику-охолоджувачі. Такий підхід є вкрай нераціональним, оскільки в цьому випадку вирішується тільки завдання утилізації ТПВ, а енергія, що виділилася при спалюванні втрачається. Безсумнівно ця енергія повинна бути використана або шляхом створення окремої ТЕС на базі підприємства, що спалює ТПВ, або шляхом інтеграції в теплові мережі великих міст для попереднього нагріву мережної води. В рамках заводу Енергія ці роботи розпочато в 2013 р. [30].

Питання використання енергії, що виділилась при спалюванні ТПВ, також вийшли на перший план на відповідних підприємствах

пострадянського простору. Зокрема, в Москві на спецзаводі № 2 (СЗ) встановлені дві турбіни потужністю 2 МВт, а на СЗ № 4, дві турбіни потужністю по 6 МВт.

Адекватна оцінка зазначених факторів в даний час і на перспективу дозволила розробити типовий ряд потужностей (за кількістю відходів, що переробляються) для російських ТЕС на ТПВ: 180, 360 і 540 тис. тонн ТПВ /рік. З урахуванням результатів експериментально-аналітичного вивчення теплотехнічних властивостей ТПВ була визначена встановлена електрична потужність цих ТЕС: 12, 24 і 36 МВт.

Важливим етапом створення ТЕС на ТПВ є розробка та обґрунтування принципових технічних і технологічних рішень, що дозволяють максимально ефективно перетворити енергетичний потенціал ТПВ в електричну енергію з найменшим впливом на навколишнє середовище і з оптимальними показниками по надійності і економічності.

Ключовим завданням у процесі створення ТЕС на ТПВ є розробка основних шляхів підвищення ефективності електростанції на всіх стадіях, починаючи від підготовки ТПВ до спалювання і закінчуючи очищенням і переробкою твердих залишків і газоподібних продуктів згоряння.

В роботі [31] обґрунтовано, що для отримання вихідних даних і проектування ТЕС на ТПВ необхідно попередньо вирішити питання паливозабезпечення ТЕС відповідної потужності; обрати раціональний спосіб спалювання ТПВ; визначити технологічні та конструктивні параметри, за яких будуть забезпечені високий рівень енергетичної ефективності паросилового обладнання ТЕС на ТПВ; відпрацювати ефективну технологію очищення газоподібних продуктів згоряння ТПВ (з урахуванням вітчизняної специфіки); розробити рекомендації щодо переробки та утилізації золових залишків.

1.3 Види технологій спалювання ТПВ

1.3.1 Спалювання ТПВ на колосникових решітках

До технологій термічної переробки ТПВ, які пройшли промислову апробацію, відносяться: спалювання на механічних колосникових решітках в шарових топках (в даний час в усьому світі експлуатується більше 2 тис. установок), спалювання в киплячому шарі (близько 200 установок), спалювання в барабанних печах (приблизно 20 установок), комбіновані методи з використанням процесів піролізу і газифікації, в тому числі з плазматронами. Специфіка технологічних процесів на установках, що спалюють ТПВ на колосникових решітках, в порівнянні з традиційними котлами обумовлена необхідністю спалювати ТПВ з широким діапазоном зміни питомої теплоти згоряння; обов'язковою витримкою газоподібних продуктів згоряння при температурі понад 850 ° С протягом не менше 2с для розкладання діоксинів, які можуть утворюватися при горінні ТПВ; обмеженням їх температури на вході в конвективні поверхні (не більше 750 ° С) за умовами мінімізації шлакування цих поверхонь; підтриманням оптимальної для роботи системи газоочищення температури димових газів на виході з котла.

Типовими прикладами підприємств пострадянського простору, що спалюють ТПВ на колосникових решітках, є Київський завод «Енергія», та в РФ МСЗ № 2 та Череповецький сміттєспалювальний завод.

Технологія спалювання ТПВ на сміттєспалювальному заводі «Енергія»

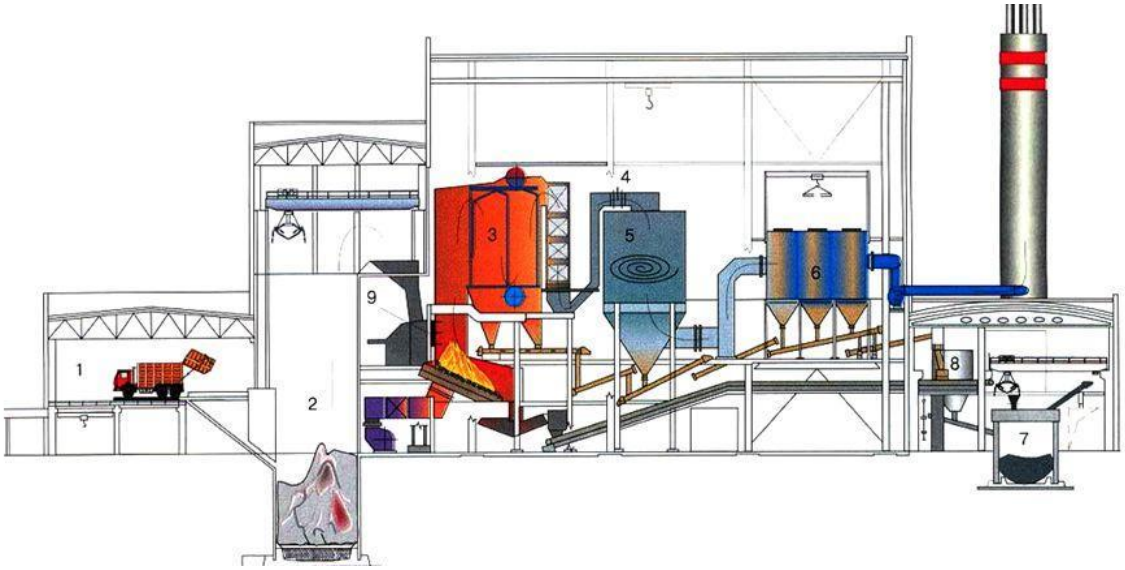
Сміттєспалювальний завод «Енергія» ПАТ «Київенерго» є єдиним українським підприємством, що в промисловому обсязі спалює ТПВ. Він розташований на території міста Київ у Дарницькому районі. Його введено в експлуатацію у грудні 1987 р.

На заводі «Енергія» встановлено чотири сміттєспалювальних котлоагрегати виробництва ЧКД «Дукла» (Чехія) встановленою потужністю 15 т ТПВ на годину кожний.

Режим роботи заводу цілодобовий з річним фондом 8760 годин. З урахуванням коефіцієнту ефективності використання робочого часу, що залежить від часу профілактичних перевірок, планово-попереджувальних та позапланових аварійних ремонтів, ефективний річний фонд часу роботи основного технологічного обладнання становить близько 7500 годин.

Фактично на заводі одночасно у роботі знаходяться не більше трьох з чотирьох встановлених котлів, що підтверджується 30-річним терміном експлуатації заводу.

На заводі «Енергія» успішно застосовується технологія прямого спалювання несортованих твердих побутових відходів. Схему заводу «Енергія» представлено на рис. 1.3. [31].



1 – приймальне відділення, 2 – бункер відходів, 3 – котлоагрегат, 4 – реактор летючого потоку, 5 – абсорбер, 6 – блок рукавних фільтрів, 7 – бункер шлаку, 8 – бункер золи, 9 – система пригнічення утворення окислів азоту, 10 – димова труба

Рисунок 1.3 – Схема устаткування заводу «Енергія»

Сміттєвози при заїзді на вагову проходять через «рамку» радіаційного контролю, після чого зважуються. Після цього вони прямують на площадку прийому відходів, де розвантажуються у бункер відходів. Із бункера за

допомогою грейферних кранів відходи направляють до завантажувальної воронки котлу. Дозування до топки котла виконується гідравлічним живлючим столом.

Конструкція топки

Нижня частина топки складається з валків діаметром 1,5 м і довжиною 3,5 м в кількості 6 штук. Валки розташовані під кутом нахилу до горизонту 30°. Валки набрано з колосників із зазорами між ними для проходження повітря. При ростопці спочатку включаються газові пальники для підйому температури, а потім розпочинається подача відходів. Первинне повітря подається під валки, продувається крізь колосникові решітки валків і забезпечує процес горіння. Вторинне повітря подається над валками для допалювання горючих газів, що виділяються з шару ТПВ. Для підтримики процесу горіння і забезпечення повного спалювання відходів валки обертаються. У оператора є можливість змінювати частоту обертання і напрям. Це дозволяє більш рівномірно розподілити відходи на валковій решітці.

Середня висота складування відходів складає біля 20 м, це дозволяє під власною вагою ТПВ видавлювати з відходів частину рідини і таким чином знижувати їх вологість перед потраплянням до топки. Нижня частина бункеру відходів має дренажну систему, звідкиля рідина відводиться до каналізації.

Якщо теплота згоряння ТПВ недостатня для підтримки в топковому просторі заданого температурного рівня (850°С), включаються горілки для спалювання додаткового палива (природного газу). Серед контрольованих параметрів топки є лише температура топкового простору та витрата додаткового природного газа. Витрата первинного і вторинного повітря не котролюється.

При спалюванні ТПВ виробляється теплова енергія, частина якої корисно використовується для власних потреб заводу, решта – скидалась на градирні, з 2015 р. після побудови перетинки від заводу до зворотної

тепломагістралі ТМ-1 станції теплопостачання «Позняки» частина теплової енергії подається в теплові мережі ПАТ «Київенерго» для підігріву зворотної мережевої води СТ «Позняки».

Електроенергія для потреб заводу закуповується на оптовому ринку електроенергії.

Продукти згоряння ТПВ мають високу токсичність через присутність в них не тільки звичних забруднювачів атмосфери, що утворюються при спалюванні традиційних палив (зола, CO, оксиди сірки та азоту), а й інших різноманітних забруднюючих речовин, що містяться у відходах, та продуктів їх термічної переробки (сполук фтору, хлору, важких металів та інших).

В процесі термічної переробки твердих побутових відходів утворюються шлак, зола, стічні води, газоподібні продукти згоряння, а також відходи, одержувані в результаті роботи пристроїв по очищенню відпрацьованих газів. Їх кількість розподіляється приблизно наступним чином:

- маса шлаку - 25-35% і обсяг 10-20% від початкового об'єму ТПВ;
- маса золи - приблизно 2,5 - 3% початкової маси ТПВ;
- газоподібні продукти згоряння - приблизно 5000-6000 $м^3$/т ТПВ (при 0,1013 МПа, 0 ° С) із залишками золи приблизно 0,03% ТПВ та концентрацією до газоочисних приладів 5-10 г/$м^3$, димові гази – переважно азот, водяна пара, кисень і вуглекислий газ.
- залишкові продукти діяльності технології очищення продуктів згоряння, згідно застосованим нейтралізуючими і осадовим реагентам.

Значна токсичність багатьох з цих компонентів зумовлює необхідність застосування систем їх знешкодження та очищення, які займають значне місце в процесі термічної переробки ТПВ як за займаємою територією, так і за собівартістю.

Тверді продукти термічної переробки ТПВ допускають можливість складування, та в подальшому частково використовуються (в будівництві шляхів, тощо), решта вивозиться на полігони.

Основну небезпеку з позицій впливу на навколишнє середовище створюють газоподібні продукти спалювання.

Слід підкреслити, що на обробку (очищення і знешкодження) величезних обсягів летючих викидів відводиться вкрай обмежений час (наприклад, через електрофільтр потік пилогазової суміші проходить за 5-20 с). Уповільнити цей процес неможливо, оскільки для цього буде потрібно збільшення розмірів газоочисних споруд, не виправдане з точки зору технології очищення.

Схема підприємства, реалізована на зводі «Енергія», є досить типовою для пострадянського простору. Так, на рис 1.4 показано принципово аналогічну схему переробки ТПВ на сміттєспалювальному заводі м. Череповця [32].

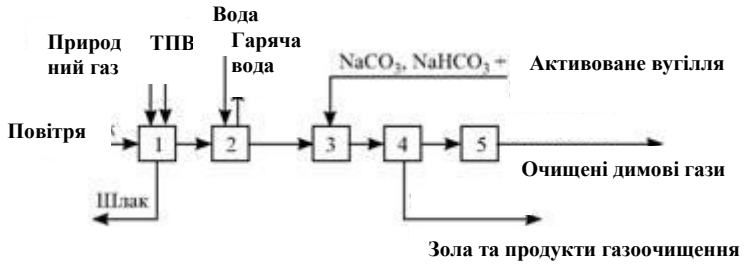


Рисунок 1.4 – Принципова схема переробки ТПВ на заводі з комплексної переробки відходів м. Череповця (1-топка, 2- котел-утилізатор, 3- мокро сухий абсорбер, 4-рукавний фільтр, 5- димосос)

Спільні риси обладнання підприємств пострадянського простору

Більшість сміттєспалювальних заводів пострадянського простору реалізує шарове спалювання відходів, яке є раціональним з точки зору енергетичної ефективності процесу термічної переробки ТПВ для умов цих

країн [33]. На заводах встановлено котельні агрегати, що дозволяють забезпечити необхідний режим для найбільш повної деструкції і окислення органічних компонентів, що істотно знижує утворення ПХДД/ПХДФ і монооксиду вуглецю. Заводи обладнані багатоступінчастими системами газоочищення з використанням лужного реагенту і активованого вугілля, а також сучасною АСУ ТП, що дозволяє здійснювати автоматичний запуск установки.

Для забезпечення повноти процесу спалювання в потік продуктів згоряння подається вторинне повітря. Шлак видаляють знизу топки, а тепло димових газів використовують для отримання пари або гарячої води в котлі-утилізатори. Висока температура і надлишок окислювача в установці забезпечують досить повне перетворення утилізованих твердих побутових відходів в стійкі продукти окислення.

Всі заводи, як правило, використовують іноземне програмне забезпечення контролера. В більшості випадків воно є закритим для доступу фахівців заводу, що практично виключає будь-яке налагодження обладнання без участі представників постачальника обладнання.

Відмінності в обладнанні та технології підприємств.

Відмінності полягають в способах переміщення ТПВ уздовж топки. Для умов заводу «Енергія» ця задача виконується за допомогою валків, що обертаються. Для МСЗ № 2 решітку оснащено механізмом оборотного перештовхування, а на заводі м. Череповця процес проводиться на нерухомому поду, а переміщення відходів від вузла завантаження до шлакової воронки проводиться періодично за допомогою шлакових плугів. Для більшості підприємств повітря підігрівається в рекуператорі і подається знизу під решітку; в схемі установки м. Череповця повітря не підігрівається і вдувається в топку з бічних стін.

1.3.2 Спалювання ТПВ у киплячому шарі

Відома також технологія спалювання ТПВ в вихровому киплячому шарі. На пострадянському просторі вона вперше була освоєна на МСЗ № 4 (м. Москва, РФ) [34].

Суть цієї технології полягає в тому, що в нижній частині топки, в якій відбувається основне горіння відходів, за рахунок відповідної подачі повітря, форми решітки та конструкції топки формуються парні вихрові зони - так званий вихровий киплячий шар (рис 1.5).

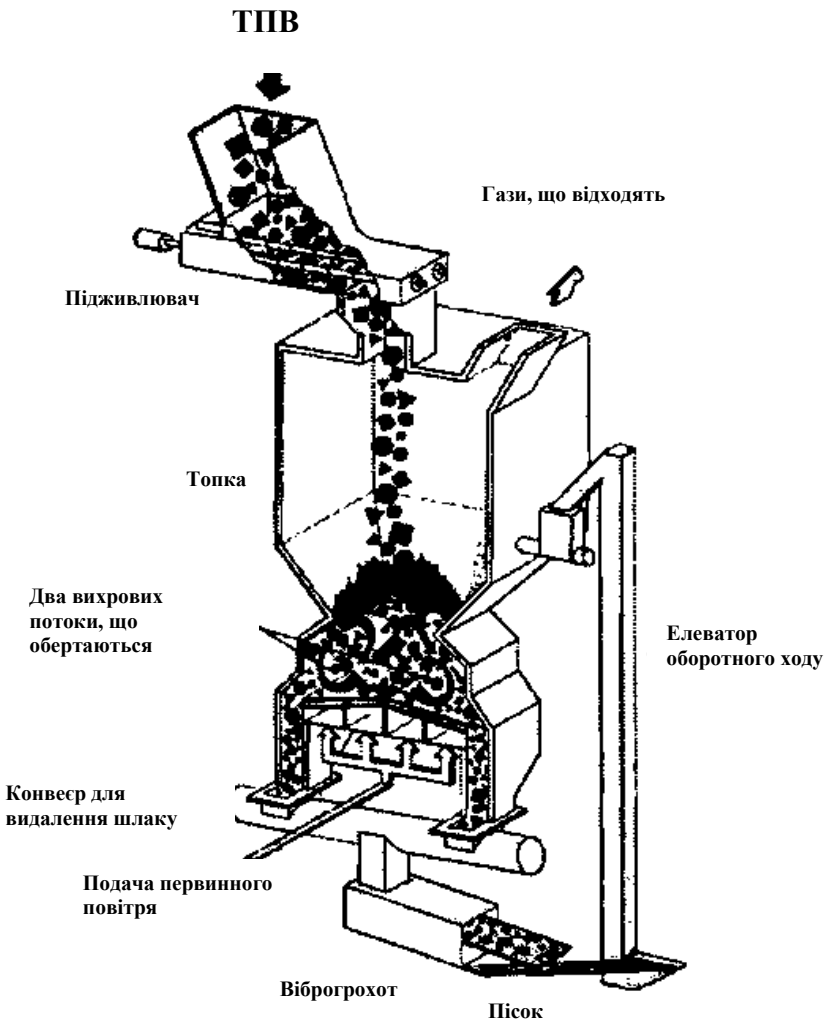


Рисунок 1.5 – Схема установки для спалювання ТПВ у киплячому шарі

Для видалення шлаку використовують контур зовнішньої циркуляції матеріалу шару, що складається з водоохолоджуваних шнеків вивантаження, вібросита, з якого велика зола шару (шлак) відводиться з

установки, а дрібна зола за допомогою горизонтального шнека і елеватора надходить в перепускний бункер і повертається в топку [35].

Крім топки, до складу кожної енерготехнологічної установки входять розташовані за нею послідовно по ходу газів котел-утилізатор, циклон, абсорбер, в якому розпилюють вапняне молоко, вузол подачі реагентів для уловлювання діоксинів, фуранів і ртуті, рукавний фільтр і димосос.

На відміну від спалювання на колосникових решітках, при спалюванні відходів в вихровому киплячому шарі порушення в системі розподілу або витрати первинного повітря, в роботі контуру зовнішньої циркуляції матеріалу шару, а також відхилення, пов'язані з виходом температури шару за встановлені межі або викликані потраплянням і накопиченням великих матеріалів з розмірами більше 50 мм (в першу чергу металевих фрагментів) можуть викликати шлакування шару, яке призводить до тривалого останову всієї енерготехнологічної установки.

В роботах [36-37] показана важливість забезпечення наявності виражених парних вихрових зон в шарі і поліпшення перемішування ТПВ і вивантаження матеріалу шару. Також виявлено закономірності впливу витрати первинного повітря на тепловиділення в нижній частині топки і зростання за рахунок цього температури шару, а також обґрунтовано ефективність реалізованого двоступеневого спалювання.

Важливе значення має надійність роботи контуру зовнішньої циркуляції матеріалу шару. Встановлено експериментальне співвідношення між продуктивністю установки, зольністю відходів і частотою обертання шнеків вивантаження. Наприклад, при спалюванні 16 т/год відходів з зольністю приблизно 30% оптимальна частота обертання цих шнеків повинна складати 13 ... 14 об / хв. В цьому випадку з топки вивантажується близько 20 т/год матеріалу: приблизно 3 ... 4 т/год у вигляді шлаку (золи шару) виводиться назовні, а інший матеріал (більше 80%) повертається в шар.

Встановлено, що при температурі вище 700 ° С велика ймовірність шлакування шару і інтенсивного утворення відкладень на стінах топки, а спалювання відходів при температурі менше 550 ° С відбувається з неповним згорянням окремих компонентів ТПВ, що в кінцевому підсумку викликає завал поду топки відходами, що не згоріли повністю.

Встановлено, що на відміну від колосникового спалювання на решітках при спалюванні в вихровому киплячому шарі виноситься в 2,0 ... 3,5 рази більше золи, і відповідно частка золи винесення становить 20 ... 30% загальної кількості золошлакових залишків, більша їх частина осідає в котлі-утилізатори і циклоні (більше 85% загальної кількості летючого попелу).

1.3.3. Особливості спалювання ТПВ в Європі, США та Японії

Головною особливістю спалювання ТПВ в Європі, США та Японії є підходи щодо підготовки ТПВ, що поступають на сміттєспалювальні заводи [12, 13, 15]. В попередні десятиріччя було сформовано стійку та ефективну систему роздільного збору відходів, що дозволяє підвищити теплоту згоряння палива, покращити показники роботи топок, полегшити вирішення задачі знешкодження шкідливих речовин в продуктах згоряння. Набирає розповсюдження технологія спалювання окремих органічних фракцій відходів у вигляді сухих гранульованих пелет (так звана RDF-технологія).

Що стосується конструктивних рішень з організації роботи топок, в яких спалюється ТПВ то вони є принципово подібними до тих, що використовуються на пострадянському просторі. Позитивною відмінністю іноземного обладнання є наявність високорівневих систем автоматичного керування, для забезпечення роботи яких проводиться контроль всіх основних параметрів процесу.

1.4 Теплотехнічні властивості ТПВ

Основною теплотехнічною характеристикою ТПВ є теплота згоряння, яка визначається елементним складом сухої горючої маси, вмістом золи та вологи [38, 39]. Важливу роль відіграють також теплотехнічні характеристики мінеральної частини ТПВ, насамперед температура пом'якшення.

Нижча теплота згоряння ТПВ для українських умов не перевищує в найкращому випадку 7500–8000 кДж/кг, при вологості влажность – 30–40%, та зольності – 25–30%. В ряді випадків теплота згоряння понижається до рівня 5000 кДж/кг при вологості біля 60%.

За рахунок зміни морфологічного стану (збільшення долі пакувальних матеріалів, пластика, паперу, зменшення долі харчових відходів) має місце тенденція з підвищення теплоти згоряння ТПВ. В країнах Західної Європи ця величина сягає 10 500–12 500 кДж/кг [12, 13].

Визначення теплоти згоряння ТПВ, що поступає для спалення, є важливою задачею. Для вирішення цієї задачі зазвичай використовуються прогнозний метод, за яким спочатку визначають масова частка кожного з основних компонентів, а потім з урахуванням теплоти згоряння кожного з компонентів розраховується теплота згоряння ТПВ [40-43].

Але слід мати на увазі, що ТПВ представляють собою багатокомпонентну гетерогенну суміш матеріалів з різним елементним складом, питомою теплотою згоряння і мінеральною частиною, а також фракційним і гранулометричним складом. Основні горючі компоненти цієї суміші відомі - це харчові та паперові відходи, пластик, текстиль, шкіра, деревина. Однак, навіть знаючи питомі вагові показники цих компонентів в загальній масі суміші, визначити інтегральні теплотехнічні характеристики ТПВ, використовуючи прийнятий в теплотехніці метод розрахунку, практично неможливо. Складність полягає в тому, що вміст вологи в кожному з перерахованих компонентів залежить від сезону, природних умов, місця і способу збору, культури населення і т.д. і змінюється в досить

широкому діапазоні. Крім того, суміш горючих відходів забаластована камінням, металом, склом та іншими негорючими матеріалами [44, 45].

У зв'язку з цим авторами робіт [46-48] була спеціально розроблена і пройшла промислову апробацію нова оригінальна методика визначення основних теплотехнічних характеристик ТПВ, пристосована для прикладного використання на енергоустановках, що спалюють ТПВ.

Суть методики полягає в тому, що відібрана представницька проба ТПВ попередньо шляхом просіювання через сито з розміром осередків 50х50 мм поділяється на дрібну і велику фракції. Остання сортується по компонентним групам на папір, текстиль, пластмасу, метал, інші неорганічні матеріали і харчові відходи. Визначається масова частка кожної з цих компонентних груп, включаючи частку дрібної фракції. Далі в лабораторних умовах вимірюється вологість і зольність на суху масу цих компонентних груп, а потім розраховуються інтегральні значення питомої теплоти згоряння, вологості і зольності в цілому для ТПВ за відомими формулами.

Ця методика пройшла апробацію на МСЗ № 2, де з її використанням було проведено декілька серій експериментів по визначенню теплоти згорння, вологості і зольності ТПВ, що надходять на спалювання. Отримані дані порівнювалися з результатами балансових теплових випробувань, виконаних в той же час. Різниця в значеннях, визначених обома способами, не перевищила 6,6% середньої величини.

Надалі оформлену у вигляді стандарту організації (СТО ОТІ 44.001-2011) методику застосовували для отримання вихідних даних по ТПВ, які використовувалися для проектування нового і реконструкції існуючого обладнання для спалювання ТПВ, а також для розробки і систематичного оновлення режимних карт діючих установок московських заводів.

З використанням цієї методики встановлено теплотехнічні характеристики ТПВ в м. Москва. Визначено загальну вологість ТПВ, яка в залежності від пори року, атмосферних умов та особливостей збору

змінюється від 32 до 44%, і зольність (на суху масу), значення якої варіюється в межах 40 ... 50%. Теплота згоряння на робочу масу досліджених проб перебувала в межах 5,8 ... 7,6 МДж/кг, іноді підвищуючись майже до 8,4 МДж/кг, і залежала, в основному, від вологості ТПВ. При наявних коливаннях морфологічного складу ТПВ теплота згоряння горючої частини ТПВ змінювалася в невеликих межах: 21,1 ... 22,2 МДж/кг. Елементний склад горючої маси: $C^г$ - 55 ... 57,5%; $H^г$ - 7,2 ... 7,6%; $O^г$ - 32,4 ... 35,3%; $N^г$ / - 1 0.. 1,2% $S^г$ - 0,7 ... 1,25%, $C^г$ / - 0,77. ..1,0%.

Мінеральна частина вихідних ТПВ містить (%): SiO_2- 57,9 ... 76,4; TiO_2- 0,4 ... 0,6; $A1_2O_3$ - 3,7 ... 5,0; Fe_2O_3 - 1,3 ... 2,2; CaO - 8,1 ... 14,0; MgO - 0.8 ... 1,1; K_2O - 1,1 ... 1,5; Na_2O - 2,0 ... 4,9; SO_3 - 2,7 ... 6,2; P_2O_5 - 0,9 ... 4,4; Cl - 1,3 ... 1,6; мікроелементи - 0,5 .. .0,6.

Але і ця досить ефективна методика носить прогнозний характер і для періодичної перевірки адекватності результатів, отриманих з її допомогою, доцільно мати альтернативну методику. При коректному використанні методів калориметрії [49-51] є можливість високоточного визначення теплоти згоряння не лише виділених компонентів ТПВ окремо, але й реальної суміші ТПВ шляхом її прямого спалювання. Проте використання стандартної калориметричної бомби для вирішення цієї задачі неможливе, оскільки наважки малої маси (декілька грамів), які застосовуються і в цьому випадку, не можуть передати особливості такої гетерогенної суміші як ТПВ.

Можливість самостійного горіння ТПВ без додаткового палива (автогоріння) визначається межами вмісту у ТПВ горючих речовин та баластуючих компонентів – вологи та золи. Шведським вченим Таннером в результаті численних досліджень процесів горіння різних видів твердих палив та ТПВ було встановлено, що спалювання ТПВ без додаткового більш калорійного палива можливо при виконанні наступних сукупних умов [51, 52]:

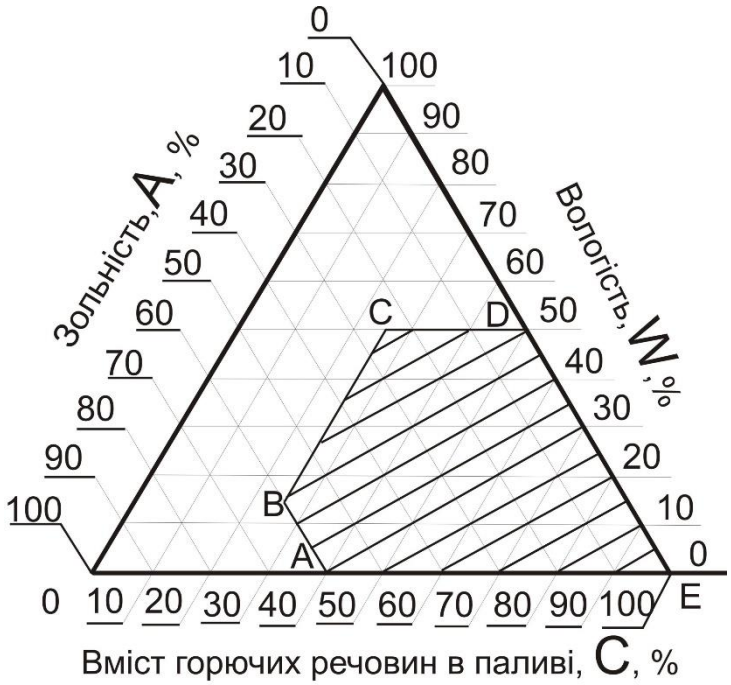
$$W < 50\%,\ A < 60\%,\ C > 25\%,$$

де W- вологість, А - зольність, С - горюча маса.

Результати своїх досліджень Таннер узагальнив в розробленій ним трикутній діаграмі (рис. 1.6), яку називають «Трикутник Таннера» або «Діаграма Таннера».

На практиці діаграма Таннера використовується для попередньої оцінки горючості композитних сумішей. Але на практиці не має впевненості, що у всіх випадках, коли згідно діаграми Таннера автогоріння можливе, вдасться реалізувати спалювання ТПВ за допомогою конкретного обладнання.

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



(ABCDE - область горіння без додаткового палива)

Рисунок 1.6 – Діаграма Таннера для оцінки можливості автогоріння ТПВ

1.5 Науково-методичний супровід вдосконалення технологій спалювання ТПВ

У процесі налагодження технології спалювання ТПВ зменшують утворення оксидів азоту і монооксиду вуглецю до значень, що відповідають чинним нормативам, мінімізують вміст горючих речовин в шлаку, а також забезпечують витримку продуктів згоряння не менше 2 с при температурі вище 850 ° С для деструкції первинних ПХДД / ПХДФ [54 -58]. Це

досягається зміною часу витримки відходів в котельній камері, регулюванням висоти шару, варіюванням загального коефіцієнта надлишку повітря, перерозподілом і нагріванням повітря, спаленням додаткового палива (природного газу).

При цьому аналітичний огляд з питань спалювання ТПВ показав, що науковий супровід цих технологій потребує подальшого вдосконалення. Так, наприклад, в інформаційних джерелах немає відомостей про наявність адаптованих загальновизнаних детермінованих математичних моделей, як гносеологічного плану, так і спрощених прогнозних моделей, які б комплексно описували процеси спалювання ТПВ.

Однією з основних причин цієї ситуації є те, що процеси спалювання ТПВ надзвичайно складні. Одна з проблем пов'язана з тим, що морфологічний і гранулометричний склади настільки різноманітні, що практично неможливо вибрати представницький розмір частки ТПВ, трансформації якої в топковому просторі можна було б відстежити [59-60].

З іншого боку, цілком ймовірно, що розробку таких математичних моделей виконано науково-виробничими компаніями, що спеціалізуються в даній області, і використовуються ними при проектуванні і налагодженні заводів зі спалювання ТПВ, однак свідомо не висвітлюються в відкритій печаті з комерційних міркувань.

У той же час відомий ряд прикладів коли за допомогою математичних моделей були досліджені і вдосконалені окремі елементи процесу спалювання ТПВ. Так в рамках проведення дослідження на МСЗ №4 було виконано чисельне моделювання процесу взаємодії факела в пальнику і висхідного потоку матеріалу вихрового киплячого шару [61, 62].

На практиці зазвичай замість комплексних детермінованих математичних моделей для дослідження та налагодження процесів спалювання ТПВ використовуються розрахункові методики. Наприклад, в роботі [58] показано, як з використанням складеної авторами розрахункової

моделі було організовано науковий супровід робіт по удосконаленню процесів спалювання ТПВ на МСЗ №2 і МСЗ №4.

Особливістю технології спалювання в українських умовах є низькі теплоти згоряння ТПВ [63-65].

1.6 Екологічні аспекти спалювання ТПВ

Захист атмосферного повітря - одне з найбільш актуальних завдань, вирішення якого, як показує світовий досвід, багато в чому визначає перспективи розвитку електростанцій, що використовують ТПВ в якості палива. Як правило, нормативи щодо викидів для ТЕС на ТПВ більш жорсткі, ніж прийняті для електростанцій, що працюють на органічному твердому паливі.

Результати виконаного аналітичного огляду існуючих методів і технологій очищення газоподібних продуктів згоряння ТПВ показують, що практично неможливо організувати одночасне зниження викидів всіх основних регламентованих показників шкідливих речовин в рамках якого-небудь одного методу або на одній технологічній стадії [66-68]. Тому на сучасних установках проблема захисту атмосферного повітря вирішується комплексно, шляхом впровадження декількох природоохоронних методів і заходів, що реалізуються на різних стадіях технологічного процесу термічної переробки ТПВ.

Вибір газоочисного устаткування визначається складом димових газів на виході з котла, які в свою чергу залежать як від характеристик самих відходів і організації їх спалювання в топці, так і від процесів, що відбуваються при охолодженні димових газів при їхньому проходженні через котел-утилізатор [69-72].

У роботах [73, 74] показано, що за рахунок вмісту в мінеральній частині ТПВ таких елементів, як кальцій, калій і натрій, в топці і котлі-утилізатори зв'язуються практично вся сірка; по меншій мірі, 20 .. .26%

хлору і 27 .. .29% фтору. Таким чином, на виході з котла в газовій фазі міститься не більше 15% з'єднань привнесеної з ТПВ сірки (SO_2), приблизно 80% хлору (HC1) і 75% фтору (HF). В цьому випадку граничні розрахункові регламентовані концентрації «кислих» газів (SO_2, HCl, HF) для обладнання, що спалює ТПВ не перевищать відповідно 220, 300 і 15 мг/м^3.

Для подальшого зниження вмісту цих «кислих» газів випробувано сорбційний метод: введення реагенту (з'єднань кальцію або бікарбонату натрію) або безпосередньо в газохід в сухому розпиленому вигляді, або в абсорбер у вигляді вапняного молока до повного його випаровування, в обох випадках з подальшою фільтрацією твердих частинок в рукавному фільтрі. На відміну від мокрого методу, який в ряді випадків застосовується на зарубіжних ТЕС, що спалюють ТПВ, очистка димових газів з використанням сорбційного методу набагато дешевше і не призводить до утворення рідких стоків [75-78].

Недоліком методу сухої сорбції є низький ступінь використання сорбенту (близько 10%). Ця проблем може бути вирішена за рахунок підмішування золи до свіжого сорбенту.

Питання утворення оксидів азоту

На сучасних установках при спалюванні твердих побутових відходів в основному утворюються паливні NO_x, кількість яких в першу чергу залежить від вмісту азоту в початкових ТПВ. За рахунок топкових заходів, наприклад, на МСЗ № 4 шляхом перерозподілу вторинного повітря, вдалося забезпечити концентрацію NO_x в димових газах на рівні 180 - 200 мг/м^3, що задовольняє сучасним світовим вимогам [81, 82]. У разі необхідності подальшого зниження концентрації NO_x за кордоном найбільшого поширення набули методи селективного відновлення [82-85].

Питання утворення ПХДЦ / ПХДФ

За рахунок згаданої вище високотемпературної витримки димових газів в першому газоході котла досягається практично необхідна нормативна концентрація ПХДЦ / ПХДФ. Однак на стадії охолодження

димових газів в конвективних газоходах котла під впливом каталітичних складових летючого попелу, наприклад хлоридів металів, відбувається утворення так званих вторинних діоксинів і фуранів. Зниження концентрації цих речовин в продуктах згоряння ТПВ проводять вже в системі газоочищення [86-90].

Слід зазначити, що в димових газах після котла діоксини і фурани містяться у вигляді найтонших твердих аерозолів (наприклад, температура плавлення тетра-ХДЦ становить 305 °С), тому приблизно 95% діоксинів і фуранів, що утворилися під час спалювання ТПВ, залишають котел, адсорбуючись на летючої золі. За допомогою комбінації адсорбційного методу, який зв'язує ПХДЦ/ПХДФ, які залишаються в газовій фазі (наприклад, за рахунок розпилення активованого вугілля перед рукавним фільтром), і ефективного уловлювання твердих частинок в рукавному фільтрі вдається домогтися необхідної очищення димових газів від діоксинів і фуранів [91-94].

Питання утилізації твердих залишків

В процесі термічної переробки ТПВ утворюються три основних види твердих залишків: шлак, що вивантажується з топкового простору (до 90% по масі від всіх твердих залишків); зола-винесення, вловлена в котлі і в апаратах золоуловлювання системи газоочистки до введення реагентів в потік димових газів (10 -30 кг/т ТПВ); і так звані продукти газоочистки - суміш твердих продуктів реакцій, залишків реагентів і дрібнофракційних залишкової летючої золи (25 -35 кг/т ТПВ) [95].

На підставі даних про склад твердих відходів спалювання ТПВ в кожному конкретному випадку можна виконати оцінку класу небезпеки шлаку і золи-винесення для навколишнього середовища. У багатьох випадках ці відходи належать до 4 або навіть до 5 класу небезпеки, що дозволяє розглядати можливість їх подальшої переробки з отриманням товарної продукції, в тому числі на території ТЕС.

Таким чином, можна зробити висновок, що застосування відомих технічних рішень дозволяє забезпечити задані показники по зниженню викидів при спалюванні ТПВ. Що стосується самої технологи спалювання, то від неї вимагається забезпечення високотемпературної витримки продуктів згоряння.

1.7 Дослідження енергетичної ефективності процесу спалювання ТПВ для вироблення електричної і теплової енергії

В основі оцінки енергетичної ефективності процесів спалювання ТПВ лежить складання теплових балансів обладнання і визначення значень критеріїв енергоефективності. В якості одного з найбільш універсальних критеріїв в даному випадку доцільно використовувати коефіцієнти корисної дії котла (к.к.д.), що спалює ТПВ, і всього комплексу з виробництва електричної енергії в цілому [96, 97].

На відміну від прийнятої в теплоенергетиці форми складання теплового балансу, коли використовують питомі кількості теплоти (віднесені до наявної теплоті, в першу чергу, до теплоти згоряння палива), при спалюванні ТПВ зазвичай обчислюють абсолютні значення теплоти і теплових втрат, так як вихідна теплота згоряння ТПВ, як правило, невідома.

Теплові втрати з фізичною теплотою димових газів (Q_2) визначають вимірюванням витрати димових газів і газового складу. Тепловими втратами від хімічної неповноти згоряння (Q_3) для агрегатів, що спалюють ТПВ, можна знехтувати, так як в сучасних установках середньодобова концентрація оксиду вуглецю в димових газах не перевищує 50 мг/м^3.Теплові втрати від механічної неповноти згоряння оцінюють визначенням вмісту горючих в шлаку (середньозважений показник).

В роботах [98, 99] показано, що використання стандартних формул для визначення Q_4 дає завищені результати. Частина горючих знаходиться в шлаку не тільки у вигляді коксового залишку з теплотворною здатністю 32,7

МДж/кг, але і у вигляді компонентів із середньою теплотворною здатністю близько 19-20 МДж/кг, які не встигли вигоріти.

Втрати тепла від зовнішнього охолодження визначаються за формулами, наведеними в [100], в залежності від результатів вимірювання температури обшивки і температуру повітря в котельному цеху.

В Європейській практиці для оцінки енергоефективності підприємств, що спеціалізуються на спалюванні ТПВ для виробництва теплової або електричної енергії, використовуються залежності вигляду

$$\frac{E_p-(E_f+E_i)}{0{,}97\cdot(E_w+E_i)},$$

де E_p – енергія, відпущена споживачеві у вигляді тепла або електроенергії (для підстановки в формулу фактична кількість енергії множиться на коефіцієнт 1,1 при відпуску тепла і на 2,6 при виробленні електроенергії), ГДж/рік;

E_f – теплота додаткового палива, витраченого на виробництво енергії, ГДж/рік;

Ew – енергія, що міститься у відходах, які переробляються, розрахована з урахуванням їх теплоти згоряння, ГДж/рік;

E_i - імпортована енергія, що отримується від зовнішнього постачальника (виключаючи E_f і E_w), ГДж/рік;

0,97 - коефіцієнт, що враховує теплові втрати з золо-шлаками відходами та в навколишнє середовище.

На сучасних підприємствах, що спеціалізуються на спалюванні ТПВ для виробництва теплової або електричної енергії, енергетична ефективність процесу становить 60 - 65%.

Якщо підприємство, яке задовольняє цій вимозі, спеціалізується на відпуску електроенергії зовнішньому споживачеві (або на комбінованому відпуску теплової та електричної енергії), його можна вважати ТЕС на ТПВ [101-102]. Виробляти електроенергію за рахунок термічної утилізації ТПВ стає економічно доцільним, якщо доходи від продажу електроенергії

покривають витрати, пов'язані з додатковими капітальними і експлуатаційними витратами на придбання, установку і обслуговування основного і допоміжного електрогенеруючого обладнання.

Створення системи діагностики процесів спалювання ТПВ

У промисловому і комунальному секторі значну роль відіграють різноманітні процеси генерації і використання теплоти. Тому питанням комплексної автоматизації теплотехнологічного і теплоенергетичного обладнання приділяється особлива увага. В даний час наявність автоматизованих систем управління технологічним процесом (АСУ ТП) і інформаційно-вимірювальних систем для теплових агрегатів великої і середньої потужності стає нормою [103-106].

Також все більшого поширення набувають АСУ ТП, доповнені компонентами діагностики та прогнозними моделями. Причому такі системи впроваджуються і для вже діючого обладнання.

Наявність інформації про поточні значення всіх параметрів, що контролюються, надає можливість їх розрахункової обробки в режимі реального часу з визначенням важливих величин, що характеризують теплову роботу агрегатів, а отже істотного поглиблення можливостей діагностики. У той же час такі системи діагностики поки не одержали загального поширення. У роботах [107-110] представлені розробки зі створення систем діагностики теплотехнічних параметрів теплотехнологічного і теплоенергетичного устаткування.

Однак в при використанні обладнання, що спалює ТПВ, відомі розробки з діагностики процесів не можуть бути використані без додаткового перегляду, оскільки в загальному випадку моментальні значення теплоти згоряння ТПВ є невідомими. Тобто, навіть при відомій масовій витраті ТПВ, що надходить на спалювання, немає можливості визначення основного компонента прибуткової частини теплового балансу – надходження теплоти з паливом.

Таким чином, доцільним є створення системи діагностики, яка на підставі розрахункової обробки сигналів чутливих елементів системи АСУ ТП дозволяла б прогнозувати в режимі реального часу поточні значення теплоти згоряння ТПВ. Наявність такої розробки дозволяє безпосередньо використовувати відомі науково-технічні рішення з побудови та аналізу моментальних теплових балансів. Аналіз всіх величин, інформація про поточні значення яких може бути отримана за допомогою системи АСУ ТП, дозволив зробити висновок, що в якості вхідних даних для створення такої системи діагностики слід використовувати поточні значення складу продуктів згоряння і витрати повітря.

1.8 Проблеми на шляху поширення технології спалювання ТПВ в українських умовах

За результатами аналізу, проведеного з використанням технічних, технологічних, екологічних і соціально-економічних критеріїв, зроблено висновок, що для українських умов спалювання в шарових топках практично несортованих ТПВ з мінімальною їх підготовкою є найбільш доцільним і економічно обґрунтованим способом термічної утилізації ТПВ як нині, так і на доступну для огляду перспективу.

Значний науково-практичний інтерес має дослідження роботи обладнання зі спалювання ТПВ в не розрахункових умовах. Однією з найбільших проблем при спалюванні ТПВ в українських умовах є низькі значення теплоти згоряння. При зміні теплоти згоряння вихідного ТПВ може з'являтися необхідність в спалюванні додаткового висококалорійного палива (зазвичай, природного газу), що істотно погіршує техніко-економічні показники підприємства зі спалювання ТПВ і тому на практиці дуже важливо визначити технологічні та конструктивні параметри, що дозволяють навіть при роботі з низькими теплотами згоряння ТПВ, мінімізувати витрати природного газу або забезпечити стійке горіння навіть

без його використання. При цьому необхідно забезпечити заданий температурний рівень в топці, що вирішує значну частину екологічних проблем.

При цьому цілком імовірно, що іноземні розробки по спалюванню ТПВ (як технічні, так і методологічні) не будуть у повній мірі задовольняти українським реаліям. Для поширення цієї технології необхідні власні теоретичні та методичні розробки, які б комплексно розглядали цю проблему з технологічної та екологічної точок зору.

Таким чином, існує потреба в створенні методик для розрахунку процесу спалювання ТПВ, що дозволяють оцінювати необхідність в спалюванні додаткового палива при роботі з низькими теплотами згоряння ТПВ, визначати технологічні параметри, при яких витрата додаткового палива може бути зменшена або зведена до нуля при гарантованій підтримці заданого температурного рівня в топці (що вирішує значну частину екологічних проблем).

На стадії проектування важливо оцінити очікувані максимальні витрати додаткового палива для заданої продуктивності топки зі спалювання ТПВ і найбільш низькою теплоти згоряння ТПВ. Крім того на стадії проектування доцільно вибрати раціональні значення коефіцієнта витрати повітря, дати якомога точніші оцінки продуктивностей вентилятора і димососа. Так, в плані моделювання необхідні розробки для підтримки проектування пристроїв зі спалювання ТПВ.

Окремий клас моделей необхідний для налагодження і можливо в перспективі для роботи в якості компонента прогнозного управління або системи діагностики. Не менш важливим завданням є створення моделей для прогнозного управління і систем діагностики, які могли б, працюючи в рамках системи АСУ ТП паралельно з основними контурами регулювання видавати прогноз поведінки обладнання (особливо в нештатних ситуаціях) і давати рекомендації щодо вибору раціональних технологічних параметрів подальшої роботи.

1.9 Висновки до розділу

На даний час технологія спалювання ТПВ є дуже поширеною в світі і найпоширенішою серед інших технологій термічної переробки відходів. За результатами аналізу, проведеного з використанням розроблених технічних, технологічних, екологічних і соціально-економічних критеріїв, показано, що для українських умов спалювання в шарових топках практично несортованих ТПВ з мінімальною їх підготовкою є найбільш доцільним і економічно обґрунтованим способом термічної утилізації ТПВ.

Однією з найбільших проблем при спалюванні ТПВ в українських умовах є низькі значення теплоти згоряння. При зміні теплоти згоряння вихідного ТПВ може з'являтися необхідність в спалюванні додаткового висококалорійного палива (зазвичай, природного газу), що істотно погіршує техніко-економічні показники підприємства зі спалювання ТПВ і тому на практиці дуже важливо визначити технологічні та конструктивні параметри, що дозволяють навіть при роботі з низькими теплотами згоряння ТПВ, мінімізувати витрати природного газу або забезпечити стійке горіння навіть без його використання.

В результаті аналізу існуючих методів визначення теплоти згоряння ТПВ зроблено висновок про необхідність розробки методики прямого визначення теплоти згоряння ТПВ. Наявність двох методів прямого і прогнозного дозволила б проводити періодичну перевірку точності прогнозного визначення теплоти згоряння завдяки ТПВ.

Екологічні аспекти спалювання ТПВ на колосникових решітках в світі відпрацьовані на високому рівні. Найважливішим аспектом для задовільнення як технологічних так і ряду екологічних вимог є підтримка температури в топковому просторі на рівні 850°С. З цієї точки зори необхідним для проектування обладнання та налагодження роботи існуючого є створення розрахункової методики для складання матеріальних

і теплових балансів, що дозволяє розглядати як процес спалювання ТПВ, так і ТПВ спільно з додатковим паливом.

За допомогою цієї методики необхідно дослідити вплив теплотехнічних характеристик процесу (склад і теплота згоряння ТПВ, коефіцієнт витрати повітря) на необхідність спалювання додаткового палива та температурний рівень процесу, а також встановити залежності, що дозволяють для довільних умов визначити чи є можливим спалювання ТПВ без додаткового палива і якщо можливе, то визначити раціональні технологічні параметри процесу.

Однією з проблем аналізу енергоефективності технології спалювання ТПВ є те, що у загальному випадку у кожний момент часу теплота згоряння ТПВ є невідомою. Отже необхідно розробити систему діагностики, що дозволяє визначати склад і теплоту згоряння ТПВ в залежності від складу продуктів згоряння, що залишають котел-утилізатор, а також відпрацювати можливість визначення рівня енергоефективності процесу спалювання ТПВ та виробництва енергоносіїв на базі розрахункової обробки в реальному часі результатів роботи системи діагностики.

1.10 Постановка мети та задач дослідження

Мета роботи полягає в визначенні раціональних технологічних параметрів, що забезпечують підвищення ефективності спалювання твердих побутових відходів з низькою і нестабільної теплотою згоряння.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі:

- розробити методику експериментального вивчення умов спалювання і визначення фактичного тепловиділення при спалюванні ТПВ;
- дослідити умови спалювання модельних наважок ТПВ зі складом і вологістю, характерним для м. Києва, в умовах експериментального котла-калориметра;

- експериментально визначити прямим способом тепловиділення при спалюванні модельних наважок ТПВ і порівняти результати з розрахунковими значеннями, що відповідають складу ТПВ;
- розробити розрахункову модель процесу згоряння ТПВ, що дозволяє будувати підсумкові матеріальні і теплові баланси процесу як для окремого спалювання ТПВ, так і для випадку з використанням додаткового палива для підсвічування;
- визначити раціональні технологічні параметри спалювання ТПВ з низькою і нестабільної теплотою згоряння;
- розробити систему моніторингу параметрів процесу спалювання ТПВ, яка дозволяє на підставі аналізу вмісту компонентів продуктів згоряння визначати склад ТПВ і тепловиділення при його спалюванні, а також проводити оперативну оцінку енергетичної ефективності використання ТПВ для вироблення пари.

РОЗДІЛ 2.
ОСНОВНІ МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Згідно висновків, зроблених при проведенні аналітичного огляду та поставлених задач дисертаційного дослідження, необхідним є створення методики прямого експериментального визначення тепловиділення при спалюванні конкретних наважок ТПВ та вивчення умов спалювання, а також методики для побудови та аналізу матеріальних та теплових балансів спалювання ТПВ як окремо так і разом з додатковим паливом.

2.1 Методика експериментального визначення тепловиділення при спалюванні ТПВ та дослідження умов спалювання

Для виконання означених експериментальних досліджень розроблено експериментальний стенд, до складу якого входять [107]:

- котел-калориметр з водоохолоджуваним контуром, обладнаний колосниковою решіткою та системою газового підсвічування;
- пункт підготовки наважки ТПВ заданого морфологічного складу, обладнаний вагами та засобами подрібнення та змішування ТПВ;
- балон зі зрідженим газом (пропан-бутан), обладнаний системою регульованої подачі газу;
- пункт визначення зольності наважки, обладнаний вагами.

Додатково використовуються: калориметр для визначення теплотворної здатності газу та муфельна піч для попереднього просушування наважки.

Основним елементом експериментального стенду є спеціально підготовлений для спалювання ТПВ водогрійний опалювальний котел КСТГ-12,5 номінальною потужністю 12,5 кВт виробництва Мінського заводу, Білорусь, який надає можливість спалювати наважку вагою 5-8 кг заданого морфологічного складу. Загальний вид котла показано на рис. 2.1. Схему розміщення точок входу-виходу циркулюючих потоків води в котлі показано на рис 2.2. Загальний вид пункту спалювання ТПВ на базі котла показано на рис. 2.3.

Рисунок 2.1 – Загальний вид котла КСТГ-12,5

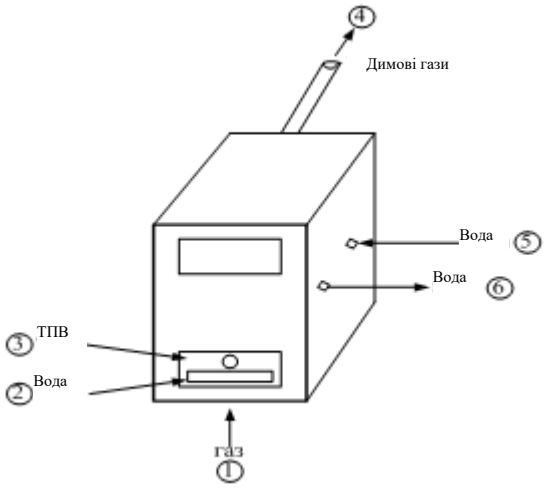


Рисунок 2.2 – Схема розміщення точок входу-виходу циркулюючих потоків: 1 – подача горючого газу з балону до пальника, 2 – ємність з водою, що розміщена під пальником, 3 – люк завантаження наважки ТПВ на колосникову решітку, 4 – патрубок виходу димових газів, 5 – патрубок входу теплоносія (води), 6 – патрубок виходу теплоносія

Котел (1) обладнаний спеціальною кошиковою шаровою топкою, яка забезпечує повітряний зазор між водоохолоджуваними стінками та нерухомим шаром наважки ТПВ. Наважка ТПВ розташовується на нерухомій горизонтальній колосниковій решітці (3), яка, задля забезпечення утримання елементів наважки ТПВ на колосниковій решітці, обладнана обмежувальною сіткою. Під колосниковою решіткою розташована ємність з водою для додаткового зволоження наважки ТПВ (15).

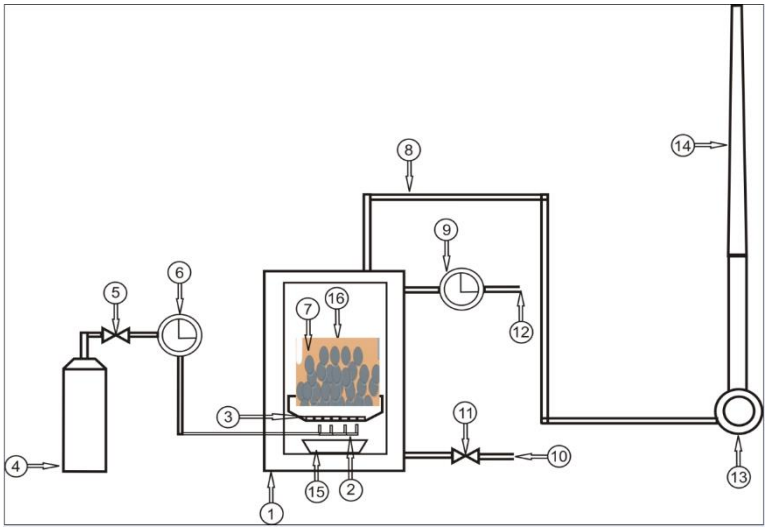


Рисунок 2.3 – Технологічна схема пункту спалювання наважки ТПВ:

1 - котел водогрійний; 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 котла (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 в котел; 12 - патрубок відводу води з котла; 13 - димосос, шибер - регулятор відхідних газів; 14 - димова труба; 15 - ємність з водою для зволоження наважки ТПВ; 16 наважка ТПВ.

Котел обладнаний подовим пальником (2), який працює без дуттьового вентилятора. Газ (пропан-бутанова суміш) для розпалювання

та підсвічування подається з газового балону (4) крізь редуктор-регулятор подачі газу (5) на калібровані сопла газового колектора пальника (2) безпосередньо до шару наважки ТПВ (16).

Дверцятами камери спалювання служить затворний фланець з оглядовим віконцем, крізь яке здійснюється розпалювання газу, та ворушіння шару наважки ТПВ.

Вода подається від водопровідної мережі до котла через патрубок підводу води (10). Відводиться вода від водоохолоджувального контуру котла до системи імітації користувача теплової енергії через патрубок (12). Система імітації користувача теплової енергії на рис. 2.3 не показана. Продукти згоряння відводяться від котла через димосос (13) та димову трубу (14) до атмосфери.

В табл. 2.1 представлено параметри, що вимірюються в процесі експерименту.

Таблиця 2.1 – Параметри, що вимірюються в процесі експерименту

№ точки	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, °С

Пункт спалювання обладнаний наступним контрольно-вимірювальним обладнанням:

1. Витрата газу вимірюється газовим мембранним лічильником Gross MGM-UA G4 (поз. 6 на рис. 2.3, рис 2.4.а).

2. Кількість теплоти, що відводиться від котла, вимірюється ультразвуковим лічильником теплоти Sharky 775 DN 20 Qn 2,5 (Австрія) (поз. 9 на рис. 2.3, рис 2.4 б). Цей прибор виробництва компанії Elin Wasserwerkstechnik, GmbH (Австрія) має у своєму складі ультразвуковий витратомір виробництва компанії Hidrometer GmbH і призначений для виміру та реєстрації температури та витрати теплоносія.
3. Теплотворна здатність газової суміші (пропан-бутан) визначається в Інституті газу НАН України на газовому хроматографі Agilent 6890 N з мас-селективним детектором Agilen 5973 N та полуменево-іонізаційним детектором (США) відповідно до ГОСТ 22667-82 «Газы горючие природные. Расчетный метод определения теплоты сгорания, относительной плотности и числа Воббе».
4. Температура в котлі та в газоході вимірюється безперервно термоелектричними перетворювачами ТХА-1489 (хромель-алюмелеві термопари) з мікропроцесорним модулем реєстрації сигналів «Triton 6004TC») (поз. 7 та 8 на рис. 2.3, рис 2.4 в). та програмним забезпеченням «Data Recorder-T6004 ts».
5. Швидкість та витрати продуктів згоряння вимірюються за допомогою багатофункціонального прибору для виміру параметрів мікроклімату та наладки систем вентиляції «Testo 435» з комбінованим зондом з трубкою Піто.
6. Вимірювання складу та температури продуктів згоряння проводиться за допомогою газоаналізатора MRU Optima7.
7. Пункт спалювання наважки ТПВ обладнано запорно-регулюючою арматурою, а також манометром для вимірювання тиску газу.

Технічні характеристики газового лічильника, лічильника теплоти, хроматографа, модуля реєстрації сигналів термопар, приладу вимірювання швидкості та витрати продуктів згоряння, приладу для вимірювання складу

та температури продуктів згоряння представлено в Додатках (А, Б, В, Д, Ж, З) відповідно.

Для перевірки адекватності методики передбачено можливість підготовки модельних наважок із заданим вмістом основних компонентів (харчові відходи, папір та картон, полімери, скло та кераміка, метали, текстиль, деревина, гума та шкіра, залишок відходів після вилучення компонентів). Теплоту згоряння такої наважки можна визначити експериментально на створеному стенді, а можна отримати розрахунковим шляхом [38].

Рисунок 2.4 – Вимірювальні прилади, що використовуються на пункті спалювання (а – газовий мембранний лічильник Gross MGM-UA G4; б –

Послідовність підготовки модельної наважки:

– всі компоненти ТПВ подрібнюються до розміру фракцій не більше 1/20 L (де L – лінійний розмір колосникової решітки топки котла лабораторного стенду);
– моделюється наважка ТПВ визначеного морфологічного складу.
– наважка ТПВ підсушується у сушарці (муфельній печі) до повного видалення незв'язаної вологи з метою забезпечення її контрольованої вологості. Готовність наважки до спалювання визначається шляхом зважування та подальшого підсушування до отримання незмінної ваги.

Компоненти для підготовки наважки представлено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Модельні компоненти наважки ТПВ

№	Найменування компонентів ТПВ	Моделювання компонентів наважки ТПВ
1.	Харчові відходи	овочеві та фруктові очистки (картопля, морква, цибуля, яблука, відходи садівництва тощо)
2.	Папір та картон	шматки офісного паперу, періодичних газет, картону
3.	Полімери (пластик, пластмаси)	ПЕТ пляшки, одноразові поліетиленові пакети
4.	Скло та кераміка	скло скляних пляшок, черепки керамічних виробів
5.	Метали	проволока сталева та мідна, металеві кульки тощо
6.	Текстиль	х/б та шерстяне ганчір'я
7.	Деревина	гілки дерев (сосна, верба, тополя)
8.	Гума та шкіра	гумові кульки, частки автопокришок, обрізки шкіряних виробів (взуття, паски, гаманці, сумки тощо)
9.	Залишок твердих побутових відходів після вилучення компонентів	дрібне будівельне сміття, каміння, вуличний змет тощо.

Масові долі окремих компонентів наважки контролюються шляхом зважування на електронних лабораторних вагах:

– маса до 0,5 кг – на вагах SF-400C, точність приладу 0,01 г (рис. 2.5 а);

– маса 0,5…5 кг – на вагах Vinzer, точність приладу 1 г (рис. 2.5 б)

а)

б)

Рисунок 2.5 – Вимірювальні прилади, що використовуються на пункті підготовки наважки (а – електронні лабораторні ваги SF-400C; б – електронні ваги Vinzer).

нє

(у діапазоні до 30 % від заданої вологості). Зволожена наважка загружається до топки котла і спалюється з підсвічуванням горючим газом або без нього. Додаткова волога вводиться в ємності під колосникову решітку.

Перед спалюванням наважки ТПВ попередньо необхідно забезпечити стабілізацію теплового режиму топки котла шляхом спалювання горючого газу для підсвічування. Контрольний параметр прогріву топки - стабілізація температури води охолоджувального контуру.

До котла подається вода від водопровідної мережі. Необхідна витрата води в процесі експерименту визначається по фактичній теплопродуктивності котла при різниці температур гарячої та холодної води у діапазоні 10-25° С.

При досягненні стабільної температури води на виході охолоджувального контуру котла подача газу відключається. Вважається, що тепловий режим топки котла стабілізовано і котел готовий до проведення експерименту.

На колосникову решітку топки котла зі стабілізованими тепловими параметрами завантажується та рівномірно розподіляється по всій її площині ретельно перемішана наважка ТПВ вагою 4-5 кг. Дослідження може проводитись для наважок двох типів:

1. Висушена наважка. Потрібна кількість вологи враховується розрахунковим шляхом.

2. Зволожена наважка. Вологість наважки ТПВ має бути не більше ніж 20 - 30%, аби при її спалюванні без додавання газу для підсвічування її можна було запалити факелом. Додаткова волога вводиться в ємності під колосникову решітку.

При спалюванні наважки ТПВ з додатковим підсвічуванням газом, спочатку до пальника топки котла подається балонний газ для підсвічування (пропан-бутан) визначеної теплотворної здатності. Проводиться розпалювання газового пальника з наступним запаленням наважки ТПВ.

При використанні газу як розпалювального та додаткового палива, зумовлена його спалюванням теплота (визначається спаленим обсягом, який вимірюється газовим годинником, з урахуванням його теплотворної здатності) віднімається від отриманої в експерименті сумарної кількості теплоти, що виділилась при спалюванні.

Визначення витрати та температури води на вході та виході водоохолоджувального контуру котла розпочинається через 5 хвилин після розпалювання незалежно від того, проводили спалювання ТПВ з газом для підсвічування або без нього. Виміри повторюються через кожні 5 хвилин (дані контролює співробітник) до початку зниження температури води, що свідчить про закінчення горіння ТПВ, або безперервно (автоматичний реєстратор), та продовжуються з тим же часовим інтервалом до повного охолодження топки, про що свідчать рівні температури води на вході і виході котла-калориметра $t_1 = t_2$.

Тривалість процесу спалювання залежить від швидкості вигоряння наважки ТПВ.

Після закінчення експерименту зола та негорючі матеріали, що були у складі наважки, охолоджуються, збираються та зважуються. Таким чином визначається недопалена частина наважки. Зважування проводиться на лабораторних вагах А500 фірми AXIS (точність приладу 0,01 г) (рис 2.6) за стандартизованою методикою.

Рисунок 2.6 – Електронні лабораторні ваги А500 фірми AXIS

ється термічна обробка зольного залишку в муфельній пічці для забезпечення повного вигорання органічних складових зольного залишку.

Зважування охолодженого зольного залишку після термічної обробки дозволяє визначити обсяг механічного недопалу.

Охолоджений зольний залишок зважується на лабораторних вагах. Зольність наважки ТПВ визначається як відношення ваги зольного залишку до вихідної ваги наважки.

За різницею ваги до термічної обробки та після неї визначається механічний недопал при спалюванні наважки ТПВ.

Вологовміст наважки ТПВ вимірюється як різниця між кількістю доданою штучно води (оприскуванням та у ємності) та залишком води у ємності під колосниковою решіткою, що не випарилась в процесі експерименту. Вода у ємності зважується на вагах після проціджування,

щоб виділити емісійну золу. Додатково вода переливається у таровану ємність (мензурку), що дозволяє перевірити зважування.

На основі отриманих результатів розраховується кількість теплоти, що утворюється при згорянні наважки ТПВ (або ТПВ та горючого газу), за формулою:

де:

$$Q_{вид} = (Q_1 + Q_2 + Q^{пари} + Q_3 + Q_5 + Q_6) \cdot \frac{100}{100 - q_4} \qquad (2.1)$$

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 як 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.

Оціночне тепловиділення від спалювання ТПВ розраховується як відношення кількості теплоти, що виділяється при згорянні наважки ТПВ, до ваги наважки ТПВ.

$$Q_{нр}^{ТПВ} = \frac{Q_{вид} - Q_г}{P} \qquad (2.2)$$

де:

P – вага наважки з урахуванням внесеної вологи, кг.

Складові теплового балансу розраховуються стандартним чином. Так, кількість теплоти, що сприймається охолоджувальним контуром по суті визначається як:

$$Q_1 = \int_0^{\tau} \rho \cdot V \cdot Cp \cdot (t_2 - t_1) d\tau$$

де V – витрата теплоносія (м^3/с);

C_p – питома теплоємність теплоносія, кДж/(кг ·^{o}С);

ρ – густина теплоносія (кг/м^3);

t_1, t_2 – температура теплоносія (води) на вході та виході з котла (^{o}С);

τ – час проведення експерименту, с.

Фактично величину Q_1 знімаємо з показань лічильника теплоти.

Втрати теплоти з димовими газами, що відходять від котла визначаються як:

$$Q_2 = \int_0^{\tau} (I_{дг} - I_{дп}) \cdot d\tau \qquad (2.3)$$

де:

$I_{дг}$ –потік енергії з ентальпією димових газів, кВт;

$I_{дп}$ – потік енергії з ентальпією повітря, кВт.

Потік енергії з ентальпією димових газів визначається наступним чином:

$$I_{дг} = 0.01 \cdot (\%O_2 \cdot C_{O2}(t_д) + \%N_2 \cdot C_{N2}(t_д) + \%CO_2 \cdot C_{CO2}(t_д) + \%H_2O \cdot C_{H2O}(t_д)) \cdot V_д \cdot t_д$$

,

де:

$V_д$ – моментальне значення об’єму продуктів згоряння за н.ф.у., що утворюється протягом проведення експерименту, за результатами виміру, м^3/с;

$\%O_2$, $\%N_2$, $\%CO_2$, $\%H_2O$ – відсоткова концентрація компонентів в продуктах згоряння за результатами виміру, %;

$t_д$ – температура продуктів згоряння на виході з котла за результатами виміру, °С;

$C_{O2}(t_д)$, $C_{N2}(t_д)$, $C_{CO2}(t_д)$, $C_{H2O}(t_д)$ – теплоємність компонентів продуктів згоряння в залежності від температури продуктів згоряння взята з довідникових таблиць [108], кДж/(м^3·°С).

Для визначення ентальпії дуттьового повітря його витрата приймається рівною витраті димових газів.

Загальні сумарні втрати теплоти на випаровування вологи наважки ТПВ визначаються як:

$$Q^{пари} = Q^{нагрів} + Q^{випаров} \qquad (2.4)$$

де:

$Q^{нагрів}$ – кількість теплоти, необхідної для нагрівання води до температури кипіння, кДж;

$Q^{випаров}$ – кількість теплоти, необхідної для випаровування води, кДж;

Величини $Q^{нагрів}$, $Q^{випаров}$ визначаються стандартним чином згідно [109].

Втрати теплоти з механічним недопалом розраховуються за наступною формулою (у прийнятому допущенні, що сума корисного обсягу теплоти та розрахованих і виміряних втрат дорівнює 100%) :

де:

$$q_4 = \frac{m_{ТПВ}^{після\ котла} - m_{ТПВ}^{шлаку}}{m_{ТПВ}^{після\ котла}} \cdot 100 \qquad (2.5)$$

q_4 – втрати теплоти з механічним недопалом, %;

$m_{ТПВ}^{після\ котла}$ – маса зольного залишку після спалювання наважки ТПВ в котлі, кг;

$m_{ТПВ}^{шлаку}$ – маса шлаку після термічної обробки зольного залишку в муфельній печі, кг;

Втрати теплоти від охолодження поверхні котла у навколишнє повітря розраховуються за наступною формулою:

де:

$$Q_5 = k \cdot F \cdot (t_{котел} - t_o) \cdot \tau, \qquad (2.6)$$

k – коефіцієнт теплопередачі від зовнішньої поверхні котла до повітря, Вт/(м^2·К);

$t_{котел}$ – температура зовнішніх поверхонь котла, °С;

t_o – температура повітря в лабораторії, °С;

F – площа зовнішньої поверхні котла, м^2;

τ – тривалість експерименту, с

Втрати теплоти з фізичною теплотою шлаку розраховуються за наступною формулою:

де

$$Q_6 = m_{ТПВ}^{шлаку} \cdot c_{шлак} \cdot (t_{шлак} - t_o), \qquad (2.7)$$

$m_{ТПВ}^{шлаку}$ – маса шлаку в наважці ТПВ після термічної обробки зольного залишку в муфельній печі, кг;

$c_{шлак}$ – питома теплоємність шлаку, кДж/кг·°С;

$t_{шлак}$ – температура шлаку, °С;

t_o – температура навколишнього повітря (в котельні), °С.

Використання створеної методики

Створену методику протестовано при визначенні тепловиділення при спалюванні ТПВ для довільно заданих параметрів модельної наважки (Таблиця 2.3).

Таблиця 2.3 – Модельна наважка ТПВ

№ за п.	Найменування компоненту ТПВ	Моделювання компонентів наважки ТПВ	Вага сухої наважки ТПВ, кг
1	Харчові відходи	картопля	1
2	Папір та картон	шматки офісного паперу, періодичних газет, картону	0,3

3	Полімери (пластик, пластмаси)	ПЕТ пляшки, одноразові поліетиленові пакети	0,3
4	Скло та кераміка	скло скляних пляшок, черепки керамічних виробів	0,3
5	Метали	проволока сталева	0,05
6	Текстиль	х/б та шерстяне ганчір'я	0,06
7	Деревина	гілки дерев (верба, тополя), соснові тріски	0,03
8	Гума та шкіра	обрізки шкіряних виробів (взуття, паски, гаманці, сумки)	0,02
9	Залишок твердих побутових відходів після вилучення компонентів	дрібне будівельне сміття, каміння.	0, 13
10	Разом		2,2

З наданих компонентів ТПВ були підготовлені аналітичні проби шляхом подрібнення та витримки у тонкому шарі в лабораторних умовах протягом двох діб до досягнення повітряно-сухого стану. Харчові відходи (позиція № 1 в таблиці 2), які у початковому стані мали найбільшу вологість, після подрібнення були підсушені протягом 2 годин при температурі (50±2)°С, а потім витримані у тонкому шарі в лабораторних умовах протягом двох діб.

На колосникову решітку завантажували зволожену наважку ТПВ вагою 3 кг (2,2 кг сухої наважки та 0,8 л води). Під колосниковою решіткою була розміщена ємність, в яку було налито 2,06 л води для додаткового внесення вологи в топку.

Сумарна кількість вологи у топці, з урахуванням фактичної вологості наважки разом з додатковою водою в ємності, була еквівалентна вологості наважки 56,5 %.

Загальна кількість теплоти, що виділилась від згоряння ТПВ становить 21263 кДж. Встановлена тепловиділення при спалюванні ТПВ становить 4253 кДж/кг. Зольність ТПВ складає 32,9%. Отримані результати в достатній мірі погоджується з даними роботи [38] та прогнозною

розрахунковою мінімальною теплотою згоряння для умов дослідження 4427 кДж/кг (відмінність результатів не перевищує 4%).

2.2 Створення методики для розрахунку та дослідження теплових та матеріальних балансів процесів спалювання ТПВ

Розрахункова модель, що створена в даному розділі, представлена набором розрахункових залежностей, що відображають інтегральні матеріальні та енергетичні баланси для окремих етапів процесу, і відпрацьованим механізмом обміну даними між цими розрахунковими блоками [110]. Схему запропонованої розрахункової моделі представлено на Рис. 2.7.

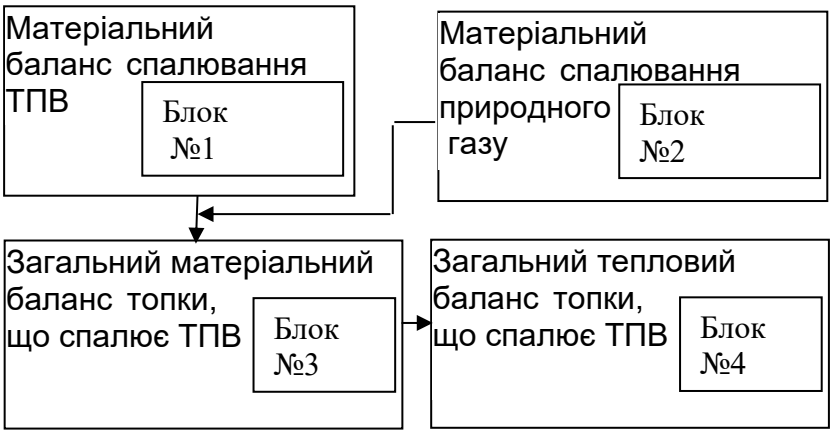


Рисунок 2.7– Схема елементів розрахункової моделі спалювання ТПВ

В елементному складі горючої маси ТПВ окрім стандартних для твердого палива елементів містяться такі елементи як хлор (0,7-1% на горючу масу), фтор, ртуть [38]. Сумарна частка всіх 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 помилка буде і того менше, оскільки хімічні перетворення названих елементів не супроводжуються значними тепловими ефектами [109].

Тому в основі побудови матеріального балансу горіння ТПВ лежить використання стандартних залежностей розрахунку горіння твердого палива [111-114].

Структура розрахункової моделі представлена чотирма взаємодіючими розрахунковими блоками. Нижче представлено їх опис.

Блок 1. Матеріальний баланс спалювання ТПВ

Ця процедура виконується з використанням залежностей, що застосовуються для розрахунків горіння твердого палива [115]. У ряді випадків залежності використовуються в стандартному вигляді, а для обліку ефектів, пов'язаних з урахуванням недопалу ТПВ, вони дещо видозмінюються.

Теоретично необхідна для спалення 1 кг ТПВ кількість кисню:

$$V_{O2\ теор}^{ТПВ} = 0.01 \cdot \left[1.867 \cdot C_т^р + 5.6 \cdot H_т^р + 0.7 \cdot (S_т^р - O_т^р)\right]. \quad (2.8)$$

Теоретично необхідна для спалення 1 кг ТПВ кількість вологого повітря:

$$V_{вл.в\,теор}^{ТПВ} = \frac{V_{O2\,теор}^{ТПВ}}{k_{O2}} \cdot (1 + 0.001242 \cdot d_{вл}), \quad (2.9)$$

де:

k_{O2} –доля кисню в сухому повітрі;

$d_{вл}$ – вологовміст повітря, що йде на горіння, г/м^3

Дійсна кількість вологого повітря для спалення 1 кг ТПВ:

$$V_{вл.в.дійсн}^{ТПВ} = \alpha \cdot V_{вл.в\,теор}^{ТПВ}, \quad (2.10)$$

де:

α – коефіцієнт витрати повітря.

Вихід продуктів згоряння при спаленні 1кг ТПВ:

$$V_{CO2}^{ТПВ} = 0.0187 \cdot C_т^р; \quad (2.11)$$

$$V_{H2O}^{ТПВ} = 0.112 \cdot H_т^р + 0.0124 \cdot W_т^р + 0.001242 \cdot d_{вл}; \quad (2.12)$$

$$V_{SO2}^{ТПВ} = 0.007 \cdot S_т^р; \quad (2.13)$$

$$V_{N2}^{ТПВ} = 0.008 \cdot N_т^р + 0.79 \cdot \alpha \cdot \frac{V_{O2\,теор}^{ТПВ}}{k_{O2}}; \quad (2.14)$$

$$V_{O2}^{ТПВ} = k_{O2} \cdot (\alpha - 1) \cdot \frac{V_{O2\,теор}^{ТПВ}}{k_{O2}} \ . \qquad (2.15)$$

Загальна кількість продуктів згоряння від спалення 1 кг ТПВ:

$$V_{пз}^{ТПВ} = V_{CO2}^{ТПВ} + V_{H2O}^{ТПВ} + V_{SO2}^{ТПВ} + V_{N2}^{ТПВ} + V_{O2}^{ТПВ} \qquad (2.16)$$

У разі необхідності врахування механічного недопалу в даній роботі пропонується наступний підхід. Недовиділення хімічної енергії пов'язано з тим, що в шлаках і золі залишається деяка кількість незгорілого вуглецю $\Delta C_{нед}$. Ця величина визначається в залежності від заданого рівня механічного недопалу (q_4,%) за такою залежністю:

$$\Delta C_{нед} = \frac{Q_{нр}^{ТПВ} \cdot q_4}{33400}, \qquad (2.17)$$

де:

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

33400 – теплота згоряння вуглецю, кДж/кг.

При цьому до виразу (2.11) необхідно підставляти не величину $C_т^р$, а $C_т^р$- $\Delta C_{нед}$, а вираз (2.15) записується у наступному вигляді:

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

Важливим елементом цього блоку є перевірка сходження матеріального балансу. При цьому порівнюються маса речовин, що вступили в реакцію, і маса продуктів реакції. Матеріальний баланс зручно будувати відносно 1 кг ТПВ. Тоді:

$$M_{прих}^{ТПВ} = 1 + V_{вл.в.дійсн}^{ТПВ} \cdot \rho_{вл.в}$$

$$M_{витр}^{ТПВ} = V_{пз}^{ТПВ} \cdot \rho_{пз}^{ТПВ} + A_т^р / 100 + \Delta C_{нед} / 100$$

Щільності вологого повітря ($\rho_{вл.в}$) і продуктів згоряння ($\rho_{пз}^{ТПВ}$) визначаються стандартним чином в залежності від їх складу як для газової суміші:

$$\rho_{см} = \frac{\sum_{i=1}^{n} C_i \cdot M_i}{22{,}4 \cdot 100}, \qquad (2.18)$$

де:

C_i – вміст і-го компонента в суміші, %;

M_i – молярна маса і-го компонента, кг/кмоль;

n – кількість компонентів суміші.

Блок 2. Складання матеріального балансу горіння природного газу

Для реалізації цього блоку використовується стандартна методика, яка застосовується для розрахунку горіння газових сумішей [109]:

Теоретично необхідна для спалення 1 м^3 природного газу кількість кисню:

$$V_{O2\,теор}^{ПГ} = 0.01 \cdot \left[0{,}5 \cdot H_2 + 0.5 \cdot CO + 2 \cdot CH_4 + 1.5 H_2S + C_m H_n \cdot (m + n/4) - O_2^т)\right],$$

де:

H_2, CO, CH_4, C_mH_n, $O_2^т$ – вміст відповідних компонентів в природному газі, %

Теоретично необхідна для спалення 1 м^3 природного газу кількість вологого повітря:

$$V_{вл.в.теор.}^{ПГ} = \frac{V_{O2\,теор}^{ПГ}}{k_{O2}} \cdot (1 + 0.001242 \cdot d_{вл}).$$

Дійсна кількість вологого повітря для спалення 1 м^3 природного газу:

$$V_{вл.в.дейст.}^{ПГ} = \alpha \cdot V_{вл.в\,теор}^{ПГ}.$$

Вихід продуктів згоряння при спаленні 1м^3 природного газу:

$$V_{CO2}^{ПГ} = 0.01 \cdot (CO + CO_2^т + CH_4 + \sum m \cdot C_m H_n);$$

$$V_{H2O}^{ПГ} = 0.01 \cdot (H_2 + H_2S + 2 \cdot CH_4 + \sum \frac{n}{2} \cdot C_m H_n + H_2O^т + 0{,}124 \cdot \frac{V_{O2}^{теор}}{k_{O2}} \cdot d_в);$$

$$V_{SO2}^{ПГ} = 0.01 \cdot H_2S;$$

$$V_{O2}^{ПГ} = k_{O2} \cdot (\alpha - 1) \cdot \frac{V_{O2}^{теор}}{k_{O2}};$$

$$V_{N2}^{ПГ} = 0.01 \cdot (N_2^т + 0{,}79 \cdot \frac{V_{O2}^{теор}}{k_{O2}}),$$

де:

$CO_2^т$, H_2S, $N_2^т$, $H_2O^т$ – вміст відповідних компонентів в природному газі, %.

Загальна кількість продуктів згоряння від спалення 1 м^3 природного газа:

$$V_{пз}^{ПГ} = V_{CO2}^{ПГ} + V_{H2O}^{ПГ} + V_{SO2}^{ПГ} + V_{N2}^{ПГ} + V_{O2}^{ПГ}.$$

Матеріальний баланс спалення природного газу записується як:

$$M_{прих}^{ПГ} = \rho_{ПГ} + V_{вл.в.дійсн}^{ПГ} \cdot \rho_{вл.в}$$

$$M_{витр}^{ТБО} = V_{пз}^{ПГ} \cdot \rho_{пз}^{ПГ}.$$

Густина продуктів згоряння природного газу ($\rho_{пз}^{ПГ}$) визначається за допомогою виразу типу (2.18) в залежності від їх складу.

Блок 3. *Складання загального матеріального балансу топки при сумісному спаленні ТПВ та природного газу*

Ця процедура виконується з використанням результатів, отриманих в блоках №1 і №2. Для випадку спільного спалювання вводиться поняття частки природного газу ξ, яка показує, скільки доданих кубічних метрів природного газу відповідає 1кг ТПВ.

Обсяги компонентів продуктів згоряння визначаються як:

$$V_{CO2} = V_{CO2}^{ТПВ} + \xi \cdot V_{CO2}^{ПГ};$$

$$V_{H2O} = V_{H2O}^{ТПВ} + \xi \cdot V_{H2O}^{ПГ};$$

$$V_{SO2} = V_{SO2}^{ТПВ} + \xi \cdot V_{SO2}^{ПГ};$$

$$V_{N2} = V_{N2}^{ТПВ} + \xi \cdot V_{N2}^{ПГ};$$

$$V_{O2} = V_{O2}^{ТПВ} + \xi \cdot V_{O2}^{ПГ}.$$

Тоді прихідна і витратна статті матеріального балансу можуть бути визначені за допомогою таких виразів:

$$M_{прих} = 1 + \xi \cdot \rho_{ПГ} + (V^{ТПВ}_{вл.в.дійсн} + \xi \cdot V^{ПГ}_{вл.в.дійсн}) \cdot \rho_{в.вл}$$

$$M_{витр} = V_{пз} \cdot \rho_{пз} + A^{p}_{т} / 100 + \Delta C_{нед} / 100.$$

Блок 4. *Складання загального теплового балансу топки, що спалює ТПВ*

Урівноваження теплового балансу проводиться за рахунок визначення калориметричної температури горіння ТПВ або ТПВ спільно з природним газом. При цьому використовуються результати побудови загального матеріального балансу топки при спільному спалюванні ТПВ та природного газу:

$$t_{кал} = \frac{Q^{ТПВ}_{нр} \cdot (1 - q_4 / 100) + \xi \cdot Q^{ПГ}_{нр}}{0{,}01 \cdot (\%CO_2 \cdot c_{CO2}(t_{кал}) + \%H_2O \cdot c_{H2O}(t_{кал}) + \%O_2 \cdot c_{O2}(t_{кал}) + \%N_2 \cdot c_{N2}(t_{кал}) + \%SO_2 \cdot c_{SO2}(t_{кал}))}, \quad (2.19)$$

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.

Теплоти згоряння ТПВ та природного газу при їх відомому складі визначаються наступним чином [109]:

$$Q^{ПГ}_{нр} = 358 \cdot CH_4 + 108 \cdot H_2 + 127 \cdot CO + 636 \cdot C_2H_6 + 913 \cdot C_3H_8 + 590 \cdot C_2H_4 + 1185 \cdot C_4H_{10}$$

$$Q^{ТПВ}_{нр} = 339 \cdot C^p_m + 1030 \cdot H^p_m - 109 \cdot (O^p_m - S^p_m) - 25 \cdot W^p_m.$$

Визначення калориметричної температури проводиться за допомогою ітераційної процедури, оскільки шукана величина $t_{кал}$ входить у вираз для свого визначення як аргумент для обчислення теплоємностей компонентів продуктів згоряння. Розрахункова процедура представлена наступним алгоритмом:

– попередньо задається значення $t_{кал}$;

– обчислюються значення теплоємностей газових компонентів;

– за допомогою виразу (2.19) визначається нове значення $t_{кал}$;

– проводиться порівняння попередньо заданого і знайденого значень $t_{кал}$. У разі збігу цих значень в межах заданої похибки, розрахунок вважається завершеним. При невиконанні цієї умови знайдене значення $t_{кал}$ використовується в якості заданого на першому кроці даної процедури.

Дійсне значення температури горіння в топці може бути визначено за допомогою виразу:

$$t_д = k_{пір} \cdot t_{кал},$$

де:

$k_{пір}$ – пірометричний коефіцієнт, який враховує відмінність дійсного значення температури від $t_{кал}$ по причині теплообмінних процесів, що протікають в топці.

Значення $k_{пір}$ є емпіричною величиною, яка повинна окремо визначатися для кожного конкретного випадку. Діапазон можливої зміни значень $k_{пір}$ становить 0,5-0,9.

Для автоматизації розрахункової процедури по визначенню $t_{кал}$ необхідна наявність функціональних залежностей теплоємностей продуктів згоряння від температури. Для цієї мети в сучасному інженерно-обчислювальному пакеті оброблені відповідні табличні дані [108] і отримані наступні рівняння регресії:

$$c_{CO2}(t) = 1.661 + 6.388 \cdot 10^{-4} \cdot t - 1.209 \cdot 10^{-8} \cdot t^2$$

$$c_{H2O}(t) = 1.471 + 2.743 \cdot 10^{-4} \cdot t - 1.642 \cdot 10^{-8} \cdot t^2$$

$$c_{O2}(t) = 1.306 + 1.947 \cdot 10^{-4} \cdot t - 3.021 \cdot 10^{-8} \cdot t^2$$

$$c_{N2}(t) = 1.278 + 1.246 \cdot 10^{-4} \cdot t - 1.157 \cdot 10^{-8} \cdot t^2$$

Схема використання розробленої математичної моделі

Схема використання розробленої моделі представлена наступним алгоритмом:

– виконується розрахунок горіння виняткового одного ТПВ (Блок №1);

– визначаються калориметрична і дійсна температури горіння (Блок №4);
– 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 витрати повітря. Якщо отримана дійсна температура нижче 850 °С необхідно спалювання додаткового палива;
– виконується розрахунок горіння природного газу (Блок №2);
– зводиться загальний матеріальний баланс спільного горіння ТПВ та природного газу з попередньо заданим значенням частки природного газу ξ (Блок №3);
– визначаються калориметрична і дійсна температури горіння (Блок №4);
– отримана дійсна температура порівнюється з рекомендованим діапазоном 850-900 °С. У разі її непотрапляння в цей діапазон відбувається повернення на 5-ий крок, де коригується значення ξ. Сукупність кроків 5-7 повторюється до тих пір, поки дійсна температура в топці не ввійде в заданий діапазон.

Також на концептуальному рівні опрацьовано розширення можливостей створеної розрахункової моделі за рахунок додавання двох допоміжних блоків. З їх використанням можна знаходити додаткові резерви для оптимізації процесу спалювання.

Матеріальний баланс попереднього бункера з урахуванням стоку частини рідини

В якості вихідних даних задається робочий склад ТПВ, що надходить на підприємство: $C_{вх}^{р}$, $H_{вх}^{р}$, $N_{вх}^{р}$, $O_{вх}^{р}$, $S_{вх}^{р}$, $A_{вх}^{р}$, $W_{вх}^{р}$, тобто вміст вуглецю, водню, азоту, кисню, сірки, золи та вологи в робочій масі ТПВ, %.

Для визначення зменшення вологості ТПВ за рахунок стоку частини рідини запропоновано використання емпіричної залежності виду:

$$\Delta W = f(H, \tau, W_{вх}^{р}, F),$$

де:

H – висота шару ТПВ в попередньому бункері, м;

τ – середній час знаходження конкретної порції ТПВ в попередньому бункері (від входу до відгрузки до топкового простору), год;

F – сила віджиму (у разі її прикладення), Н.

Сам вид залежності легко може бути встановлений шляхом обробки даних про кількість рідини, що відводиться з проміжного бункера, витраті ТПВ і висоті шару ТПВ. З причини того, що даний елемент є подібним в переважній більшості випадків спалювання ТПВ, отриманий результат буде носити досить універсальний характер. Імовірно шукана залежність має експонентний вигляд.

Для конкретного підприємства при вимірюванні витрати рідини, відведеної через дренаж $W_{вид}$ (кг/год) перехід до зменшення вологи ТПВ здійснюється як: $\Delta W = \frac{W_{вид}}{G_{вх}} \cdot 100$

Тобто після стоку рідини масова витрата вхідного ТПВ ($G_{вх}$, кг/год), перед надходженням в топку зменшується на $G_{вх} \cdot \Delta W/100$.

Склад ТПВ, що надходить в топку визначається за допомогою коефіцієнта перерахунку:

$k_{пер} = \frac{100}{100 - \Delta W}$ і складає:

$C_{т}^{р} = k_{пер} \cdot C_{вх}^{р}$; $H_{т}^{р} = k_{пер} \cdot H_{вх}^{р}$; $O_{т}^{р} = k_{пер} \cdot O_{вх}^{р}$; $N_{т}^{р} = k_{пер} \cdot N_{вх}^{р}$; $S_{т}^{р} = k_{пер} \cdot S_{вх}^{р}$;

$A_{т}^{р} = k_{пер} \cdot A_{вх}^{р}$; $W_{т}^{р} = k_{пер} \cdot (W_{вх}^{р} - \Delta W)$.

Зниження вологості ТПВ, що надходить в топку, є важливим позитивним результатом. З одного боку, конкретний рівень зниження вологості необхідно враховувати при проведенні розрахунків, з іншого, боку, необхідний пошук технологічних і конструктивних параметрів, що дозволяють домагатися якомога більшого зниження вологості ТПВ.

Матеріальний баланс попереднього бункера з урахуванням виділення газів бродіння

Відведення горючих газів бродіння з попереднього бункера в топковий простір і їх спалювання істотно стабілізують процеси горіння ТПВ. Оцінку кількості газів, що виділяються можна зробити за допомогою емпіричних залежностей. Одним з основних та найважливіших компонентів газів бродіння є метан. Питомий вихід метану, на думку авторів, ($м^3$/кг) може бути описаний за допомогою емпіричної залежності, типу:

$$V_{CH4} = f(H^p_{исх}, t, \tau),$$

де:

$H_{вх}^p$ – вміст водню в ТПВ, що поступає до попереднього бункеру, %;

t – температура, при якій ТПВ знаходиться в попередньому бункері, °С;

τ – середній час находження конкретної порції ТПВ в попередньому бункері (від входу до відгрузки в топковий простір), год.

Для отримання цих рівнянь знадобиться обробка експериментального матеріалу, пов'язаного зі складом газів бродіння, що відводяться з попереднього бункера. Аналогічні емпіричні рівняння зв'язку можуть бути отримані і для інших компонентів газів бродіння.

Для різних типів сировини, що використовується для отримання газів бродіння, є усереднені показники виходу цих газів. Так для ТПВ ця величина складає не більше 50-60 $м^3$/кг. При цьому основними компонентами газів бродіння є метан та вуглекислота при вмісті метану не менше 60% .

Загальна кількість газів бродіння ($V_{г.бр}$) може бути отримана шляхом підсумовування питомих виходів всіх компонентів. Тоді загальна кількість газів, що утворюються становить $V_{г.бр} \cdot G_{вх}$.

За допомогою досить простих залежностей є можливість перейти до зменшення маси ТПВ, що надходить в топку. Хоча воно, як правило, не є

значним, а інтерес представляє саме визначення витрати і складу газів бродіння. Ці гази через спеціальну систему каналів надходять в топковий простір і згоряють в газовому просторі топки над шаром палаючого ТПВ, що в деякій мірі стабілізує умови горіння.

Адаптація моделі

Для досягнення адекватності опису досліджуваного процесу спалювання ТПВ за допомогою розробленої моделі необхідно провести процедуру її адаптації. Для вирішення цього завдання пропонується використовувати 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 пірометричного коефіцієнта. Певні значення $k_{пір}$ в повній мірі відповідають тільки тому об'єкту і режимам експлуатації, для яких вони були отримані. Так, для спалювання ТПВ величина $k_{пір}$ залежить від теплового навантаження котла-утилізатора і знижується з її збільшенням.

В цій роботі адаптація створеної розрахункової моделі проводиться для умов сміттєспалювального заводу «Енергія». Оскільки окрім адаптації моделі при цьому встановлюється важлива характеристика обладнання для сталювання ТПВ та режимів його експлуатації, ці матеріали наведено в наступному розділі.

Основним і очевидним завданням, що розв'язується за допомогою розробленої моделі, є вирішення питання про необхідність спалювання додаткового палива в кожному конкретному випадку і визначення його необхідної витрати.

Також створена модель дозволяє досліджувати вплив технологічних та конструктивних параметрів на умови спалення ТПВ, зокрема на температурний рівень в топці. Конструктивні параметри топки, що спалює ТПВ, впливають на значення параметру $k_{пір}$, який визначається на стадії адаптації моделі.

Також можливе вирішення завдання вибору оптимального значення коефіцієнта витрати повітря, передбачуваних максимальних продуктивностей вентилятора і димососа, що потрібно для вибору конкретного обладнання.

Така методика є корисним інструментом на стадії проектування обладнання для спалювання ТПВ, при наладці та пошуку раціональних технологічних параметрів для існуючого обладнання.

2.3 Висновки до розділу

Розроблено методику та визначено технічні засоби проведення експериментальних досліджень з прямого визначення тепловиділення при спалюванні довільних наважок твердих побутових відходів. Її сутність полягає в прямому спаленні наважки ТПВ визначеної маси в котлі-калориметрі, та визначенні загальної теплоти, що виділилась при спалюванні на базі розрахункової обробки показань вимірювальних приладів за опрацьованим розрахунковим алгоритмом та встановленні теплоти, що відповідає спаленню 1 кг ТПВ. Методику перевірено на прикладі встановлення теплоти згоряння наважки ТПВ довільного відомого морфологічного стану шляхом зіставлення експериментально визначеної теплоти згоряння з розрахунковим, яке відповідає складу наважки. Похибка експериментального визначення теплоти згоряння складає не більше 4%.

В подальшому розроблену методику доцільно використовувати не лише для визначення теплоти згоряння ТПВ, а й для моделювання умов спалювання ТПВ в реальних промислових котлах-утилізаторах.

Створено розрахункову модель процесу спалювання ТПВ, основними елементами якої є блоки з побудови матеріальних балансів спалювання ТПВ, природного газу, спільного спалювання ТПВ та природного газу і теплового балансу топки, що спалює ТПВ. На концептуальному рівні відпрацьовані додаткові блоки моделі, пов'язані з побудовою матеріального

балансу попереднього бункера з урахуванням стоку частини рідини і матеріального балансу попереднього бункера з урахуванням виділення газів бродіння. Обґрунтовано доцільність проведення адаптації моделі шляхом визначення підстроєчних значень пірометричного коефіцієнта для різних режимів експлуатації.

Створена модель дозволяє вирішувати задачу визначення в кожному конкретному випадку необхідності спалювання додаткового палива для забезпечення можливості горіння ТПВ та заданого рівня температури в топці котла. При необхідності спалювання додаткового палива опрацьовано можливість визначення його необхідної витрати. Також створена модель дозволяє досліджувати вплив технологічних (наприклад, коефіцієнт витрати повітря) та конструктивних параметрів (вони враховуються через коефіцієнт $k_{пір}$) на умови спалення ТПВ, зокрема на температурний рівень в топці. Така методика є корисним інструментом на стадії проектування обладнання для спалювання ТПВ, при наладці та пошуку раціональних технологічних параметрів для існуючого обладнання.

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ СПАЛЮВАННЯ ТПВ

3.1 Експериментальне визначення тепловиділення при спалюванні ТПВ та дослідження умов спалювання

Мета цього підрозділу дисертації полягає в експериментальному дослідженні процесів спалювання ТПВ заданого складу за допомогою котла-утилізатора, що моделює спалювання ТПВ в умовах плотного шару на механізованих решітках, для вирішення питання про можливість автогоріння та визначення теплоти згоряння ТПВ.

Експериментальні дослідження спалювання модельних наважок ТПВ проводили на лабораторному експериментальному стенді на базі котла КС-ТГВ-12,5 відповідно до методології проведення досліджень з визначення морфологічного складу, теплоти згоряння наважки визначеного морфологічного складу та зольності твердих побутових відходів (ТПВ), представленої у другому розділі роботи [107].

Опис експериментального стенду, використаного обладнання, засобів контролю параметрів, а також методику їх розрахункової обробки представлено в підрозділі 2.1.

Для дослідження на базі статистичних даних заводу «Енергія» було сформовано модельні наважки з вмістом основних компонентів, який відповідає усередненому складу ТПВ в м. Києві за весняні, літні, осінні та зимові місяці 2016 р. (Таблиця 3.1) [116].

Також для додаткового вивчення питання щодо вмісту вологи розглянуто спалювання наважок з тим же вмістом основних компонентів в горючій масі при середньому рівні вологості, що відповідає повітряно-сухому стану. Приклад морфологічного складу наважок за літні місяці приведено в Таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Морфологічний склад модельних наважок ТПВ, які використовувались для дослідження

№	Найменування компоненту ТПВ	Вміст компоненту, %
1	Харчові відходи	31,12
2	Папір та картон	13,76
3	Полімери (пластик, пластмаси)	14,95
4	Скло та кераміка	18,34
5	Метали	1,4
6	Текстиль	4,71
7	Деревина	3,08
8	Гума та шкіра	2,25
9	Залишок твердих побутових відходів після вилучення компонентів	10,42
10	Разом	100
	Середня вологість, %	57,4

В рамках цієї роботи було проведено наступні експериментальні дослідження:

Режим 1: Спалювання модельної наважки ТПВ заданого морфологічного складу та вологості, з додаванням висококалорійного газу для підсвічування.

Режим 2: Спалювання модельної наважки ТПВ заданого морфологічного складу у повітряно-сухому стані, з газом для підсвічування.

Режим 3: Спалювання модельної наважки ТПВ заданого морфологічного складу у повітряно-сухому стані, без газу для підсвічування.

Спалювання наважки ТПВ заданого морфологічного складу та вологості, з газом для підсвічування

Для розігріву топки котла протягом 30 хв. спалювався висококалорійний газ (пропан-бутанова суміш). Температура в топці котла при горінні пропан-бутану становила 220…270°С. Після стабілізації температури води на виході з охолоджувального контуру до котла була завантажена зволожена наважка ТПВ (4 кг) та під колосникову решітку в ємність було налито 1 л води для додаткового внесення вологи в топку. Це

призвело до падіння температури в топці до 120°С. Через 15 хв. інтенсивного перемішування та прогрівання ТПВ почався процес горіння. Температура в топці котла становила 400...600°С.

Після згоряння ТПВ (за візуальним контролем) подачу газу було припинено.

Динаміка зміни температури в топці котла та температури димових газів в процесі експерименту представлена на рис. 3.1.

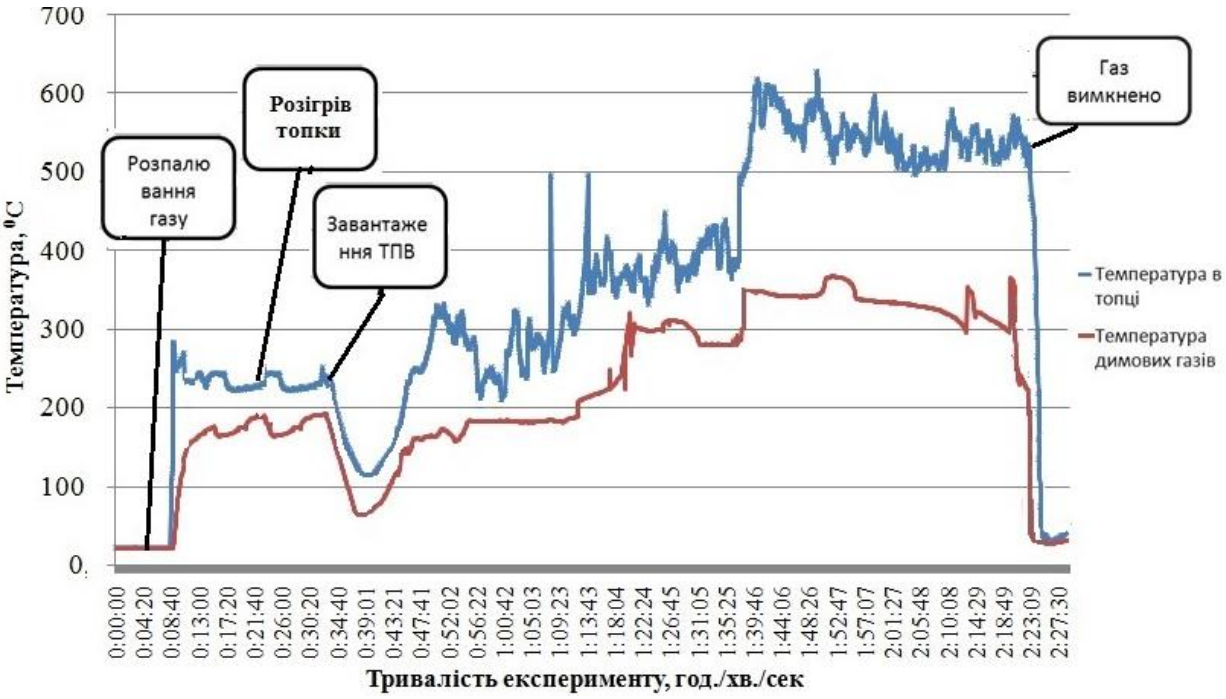


Рисунок 3.1 – Динаміка зміни температури в топці котла та температури димових газів при спалюванні наважки ТПВ заданого морфологічного складу та вологості, з газом для підсвічування

Після того, як зольний залишок вихолонув, його було зважено (результат 1,51 кг) та поміщено в муфельну піч, де було допалено те, що не згоріло в котлі. В муфельній печі вигоріло 0,125 кг.

На основі отриманих результатів проводився розрахунок кількості теплоти, що виділялась при спалюванні наважки ТПВ з заданою вологістю W=57,4%. Ворушіння наважки ТПВ дозволило провести її спалювання в

експериментальному котлі, але через втрату теплоти на випаровування 57,4% вологи наважки, при її спалюванні виділялось біля 4450-5000 кДж/кг ТПВ. Зольність наважки становила 18,4-19,7%.

Спалювання такої вологої наважки вимагає великої кількості додаткового енергоносія для підсвічування навіть при ретельному перемішуванні шару наважки.

Спалювання наважки ТПВ заданого морфологічного складу у повітряно-сухому стані, з газом для підсвічування

На колосникову решітку завантажували наважку ТПВ заданого морфологічного складу без внесення додаткової вологи. Вологість повітряно-сухої наважки ТПВ 28,6%. Подача газу для підсвічування та ворушіння шару наважки відбувались безперервно на протязі всієї активної стадії експерименту.

Для розігріву топки котла протягом 32 хв. спалювали газ (пропан-бутанова суміш). Температура в топці котла при горінні пропан-бутану становила 300…370°С. Після стабілізації температури води на виході з охолоджувального контуру до котла була завантажена наважка ТПВ (5 кг), що призвело до падіння температури в топці до 100°С. Через 6 хв. інтенсивного перемішування та прогрівання ТПВ почався процес горіння. Температура в топці котла під час горіння ТПВ становила 400...650°С. Після згоряння ТПВ (за візуальним контролем) подачу газу було припинено.

Динаміка зміни температури в топці котла та температури димових газів в процесі експерименту представлена на рис. 3.2.

Після того, як зольний залишок вихолонув, його було зважено (1,6 кг) та поміщено в муфельну піч, де було допалено те, що не згоріло в котлі. В муфельній печі вигоріло 0,095 кг.

Кількість теплоти, що виділилась при горінні наважки ТПВ під час серії експериментів, становила 7100-7200 кДж/кг ТПВ. Зольність становила 30,8-32,9%.

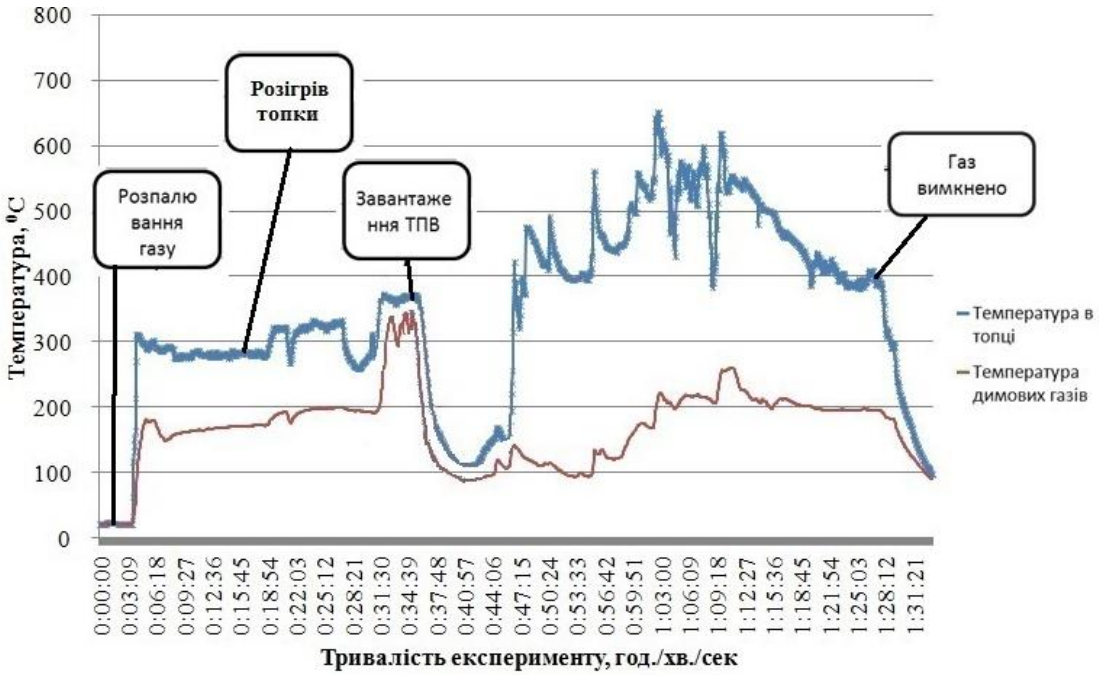


Рисунок 3.2 – Динаміка зміни температури в топці котла та температури димових газів при спалюванні наважки ТПВ заданого морфологічного складу у повітряно-сухому стані

Спалювання наважки ТПВ заданого морфологічного складу у повітряно-сухому стані, без газу для підсвічування

Для розігріву топки котла протягом 27 хв. спалювали газ (пропан-бутанова суміш). Температура в котлі при горінні пропан-бутану становила 280…320°С. Після стабілізації температури води на виході з охолоджувального контуру до котла була завантажена наважка ТПВ (5 кг), що призвело до падіння температури в топці до 200°С. Через 5 хв. після інтенсивного перемішування та прогрівання ТПВ почався процес горіння.

Температура в топці після загоряння ТПВ становила 680...720°С. Після розгаряння ТПВ подачу газу було припинено. Приблизно через 3 хв. ТПВ почали згасати і процес активного горіння припинився. Далі відбувався процес тління ТПВ.

Після того, як залишок ТПВ вихолонув, його було зважено (4,6 кг).

Динаміка зміни температури в топці котла та температури димових газів в процесі експерименту представлена на рис. 3.3.

Зведені характеристики повітряно-сухої наважки ТПВ з вологістю 28,6% повністю знаходяться в зоні автогоріння, що вказує на теоретичну можливість автогоріння ТПВ такого морфологічного складу. На практиці можливість автогоріння залежить від технології спалювання і відповідних специфічних технічних можливостей обладнання, а саме достатньої теплової інерції промислового котла великої потужності, якої не може мати жоден лабораторний експериментальний стенд, тому спалювання повітряно-сухої наважки ТПВ у котлі експериментального стенду може відбуватись також в режимі додаткового підсвічування пропан-бутановою сумішшю.

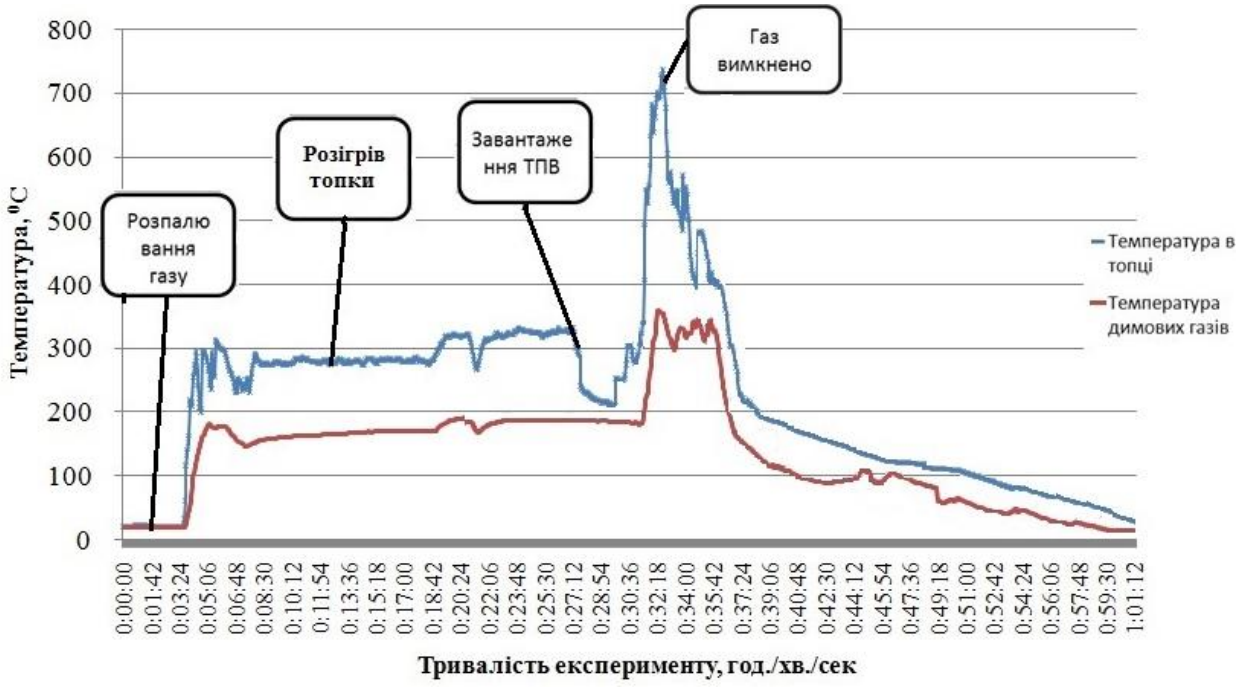


Рисунок 3.3 – Динаміка зміни температури в топці котла та температури димових газів в процесі спалювання наважки ТПВ заданого морфологічного складу у повітряно-сухому стані, без газу для підсвічування

Для співставлення отриманих результатів з літературними даними, були проведені розрахунки прогнозної теплотворної здатності ТПВ за літні місяці відповідно до теплотворної здатності ТПВ за літературними джерелами [38, 39].

Результати розрахунку прогнозної теплотворної здатності ТПВ за літні місяці

Узагальнена теплотворна здатність окремих компонентів ТПВ України, відома з літературних джерел [40], наведена в табл. 3.2. З використанням цих значень було розраховано прогнозну теплоту згоряння всієї маси ТПВ.

Таблиця 3.2 – Узагальнена нижча теплотворна здатність компонентів ТПВ України

Тип компоненту ТПВ	Нижча теплотворна здатність ТПВ	
	кДж/кг	ккал/кг
Харчові відходи	3100…3800	740…908
Папір та картон	7500…11499	1791…2747
Пластик	24399	5828
Текстиль	12099…14999	2890…3583
Шкіра та гума	20899…25199	4992…6019
Деревина	13399…14499	3200…3463
Залишок твердих побутових відходів після вилучення компонентів	3100	740

Теплота згоряння всієї маси повітряно-сухих ТПВ:

$$Q_{н\,ТПВ}^{р\,пов\text{-}с} = \sum_{i=1}^{n}(Q_i \cdot P_i)/100, \qquad (3.1)$$

де $Q_{н\,ТПВ}^{р\,пов\text{-}с}$ – теплотворна здатність повітряно-сухих ТПВ, кДж/кг;

i – індекс компоненту ТПВ;

n – загальна кількість компонентів ТПВ;

Q_i – теплотворна здатність і-го компоненту ТПВ, кДж/кг;

P_i – масова частка і-го компоненту ТПВ, %.

В роботі використано дані щодо морфологічного складу ТПВ в літні місяці як відповідні до морфологічного складу повітряно-сухого стану ТПВ. Потім в розрахунках враховувалась два рівні вологісті ТПВ: 57,4% та 28,6%.

Для цього теплотворна здатність повітряно-сухої маси ТПВ перераховувалась на теплотворну здатність сухих ТПВ за формулою:

$$Q_{н\,ТПВ}^{р\ с} = Q_{н\,ТПВ}^{р\,пов\text{-}с} \cdot 100/(100 - W_{ТПВ}^{пов-с}), \quad (3.2)$$

де $Q_{н\,ТПВ}^{р\ с}$ – теплотворна здатність сухих ТПВ, кДж/кг;

$W_{ТПВ}^{пов-с}$ – вологість ТПВ у повітряно-сухому стані, %.

Прогнозна нижча теплотворна здатність ТПВ для заданої вологості була розрахована за формулою:

$$Q_{н\,ТПВ}^{р} = Q_{н\,ТПВ}^{р\ с} \cdot (100 - W_{ТПВ})/100, \quad (3.3)$$

де $Q_н{}^р{}_{ТПВ}$ – робоча теплотворна здатність ТПВ, кДж/к;

$W_{ТПВ}$ – робоча вологість ТПВ, %.

Розрахункові прогнозні значення теплотворної здатності ТПВ в літні місяці, відповідно до літературних даних [40] щодо теплоти згоряння компонентів ТПВ в Україні, приведена в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Прогнозна розрахункова теплотворна здатність ТПВ в літні місяці

Вологість маси ТПВ	Прогнозна нижча теплотворна здатність ТПВ в літні місяці			
	min		max	
	кДж/кг	ккал/кг	кДж/кг	ккал/кг
Суха, Wтпв= 0%	10393	2482	11844	2829
Повітряно-суха, Wтпв= 28,6%	7421	1772	8456	2020
Робоча, Wтпв= 57,4%	4427	1057	5045	1205

Зведені результати

Узагальнені результати експериментальних досліджень спалювання наважки ТПВ усередненої за 3 літні місяці 2016 р. (за червень, липень та

серпень) морфології та розрахункова прогнозна нижча теплотворна здатність ТПВ відповідно до даних щодо нижчої теплоти згоряння компонентів ТПВ України з літературних джерел, представлено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Узагальнені результати досліджень спалювання наважки ТПВ та розрахункова прогнозна нижча теплотворна здатність ТПВ

Режим, №	Задані параметри	Режим спалювання		Отримані результати		Прогнозна нижча теплотворна здатність ТПВ в літні місяці, кДж/кг	
	Вологість наважки ТПВ, %	Наявність газу для підсвічування	Ворушіння шару наважки	Кількість теплоти, що виділилась при спалюванні наважки ТПВ, кДж/кг	Зольність наважки, %	min	max
	W	*так/ні*	*так/ні*	Q_{Σ}	*A*		
1	0					10400	11840
2	28,6	так	так	7100-7200	30,8-32,9	7420	8460
3	57,4	так	так	4450-5000	18,4-19,7	4430	5040

При спалюванні наважки ТПВ заданого морфологічного складу без внесення додаткової вологи (вологість повітряно-сухого стану наважки ТПВ 28,6%) з підсвічуванням висококалорійним газом та з ворушінням шару наважки виділяється 7100-7200 кДж/кг ТПВ теплоти без урахування внеску газу на підсвічування. Для наважок у повітряно-сухому стані різниця експериментально встановленого та прогнозного значень теплоти згоряння становить 15%.

Склад розглянутої наважки згідно діаграми Таннера знаходиться в зоні автогоріння (хоча й знаходиться практично на її границі), що вказує на теоретичну можливість автогоріння ТПВ такого морфологічного складу. В рамках експериментальної установки реалізувати автогоріння ТПВ такого складу не вдалося, що вказує на залежність можливості реалізації автогоріння від технології спалювання і відповідних специфічних технічних можливостей обладнання, зокрема достатньої теплової інерції котла, температури підігріву повітря, що йде на горіння тощо.

При спалюванні наважки ТПВ заданого морфологічного складу (вологість наважки ТПВ 57,4%) з внесенням додаткової вологи, з підсвічуванням висококалорійним газом та з ворушінням шару наважки виділяється 4450-5000 кДж/кг ТПВ теплоти без урахування внеску газу на підсвічування. Цей результат добре кореспондується з прогнозними даними. Згідно діаграми Таннера зведені характеристики ТПВ такого складу знаходяться поза межами зони автогоріння, що вказує на необхідність використання додаткового палива. Спалювання такої вологої наважки вимагає великої кількості додаткового енергоносія для підсвічування навіть при ретельному перемішуванні шару наважки.

Для скорочення використання додаткового палива при спалюванні ТПВ, та підвищення ефективності використання енергетичного потенціалу ТПВ, необхідно проводити спалювання ТПВ з меншим вмістом вологи.

Найбільш ефективним способом зниження вологості ТПВ є оптимізація організації процесу на стадії збирання відходів. Згідно до європейської практики, ТПВ збираються в закриті контейнери, які розташовані під навісами, задля запобігання потрапляння опадів до ТПВ.

Оскільки заміна існуючих контейнерів для ТПВ на закриті потребує значних фінансових та часових витрат, доцільно організувати процес зменшення вмісту вологи з використанням дренажу в бункері, та підсушування ТПВ перед подачею до котла, з використанням зокрема теплоти димових газів, тощо.

Зведені результати експериментів за всі сезони року представлено в Таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Результати експериментів з визначення тепловиділення наважок ТПВ зі складами, що моделюють всі сезони року

Сезони, для яких проводились експерименти	Вологість наважки ТПВ, %	Кількість теплоти, що виділяється при спалюванні наважки ТПВ, кДж/кг
весна	33,6	6780-7070
літо	28,6	7100-7200
осінь	27,4	7300-7430

зима	33,9	5112-5762

3.2 Дослідження особливостей технології спалювання ТПВ за допомогою розрахункової моделі

Адаптація моделі

Для досягнення адекватного описання процесу спалювання ТПВ за допомогою розробленої розрахункової моделі 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 пірометричного коефіцієнта. Певні значення $k_{пір}$ в повній мірі відповідають тільки тому об'єкту і режимам експлуатації, для яких вони були отримані. Так, для спалювання ТПВ величина $k_{пір}$ залежить від теплового навантаження котла-утилізатора і знижується з її збільшенням [110].

У якості першої точки, для якої проведена адаптація котла-утилізатора, що спалює ТПВ на заводі «Енергія» були обрані умови експлуатації обладнання в номінальних умовах:

– склад ТПВ, %:

$C_т^г = 56;\ H_т^г = 7{,}5;\ O_т^г = 35;\ N_т^г = 1;\ S_т^г = 0{,}5;\ A_т^c = 30;\ W_т^p = 30;$

– теплота згоряння ТПВ, кДж/кг (ккал/кг)…… 10460 (2500);

– масова продуктивність по ТПВ, що спалюється, т/год ……. 15;

– об’ємна витрата повітря

первинне повітря, тис. м^3/год……...70;

вторинне повітря, тис. м^3/год……...21;

– рівень механічного недопалу, % …….2;

– витрата природного газу для підсвічування……..відсутня;

– температура підігрітого повітря, що надходить до топки, °С…180;

– температура в топці, °С……850.

Згідно з виконаними розрахунками коефіцієнт витрати повітря при таких витратних коефіцієнтах по паливу і окислювачу становить 2,12. За допомогою програми, що реалізує розроблений розрахунковий алгоритм зроблено підбір значення $k_{пір}$, при якому розраховане значення дійсної температури в топці становило б 850 °С. Для наведеного вище набору вихідних даних отримано значення $k_{пір} = 0,735$.

Визначення $k_{пір}$ для інших умов експлуатації котла-утилізатора, що спалює ТПВ (менші теплоти згоряння ТПВ і більш низькі теплові навантаження котла) показали діапазон зміни $k_{пір}$ від 0,735 до 0,9.

Основним і очевидним завданням, що розв'язується за допомогою розробленої моделі, є вирішення питання про необхідність спалювання додаткового палива в кожному конкретному випадку і визначення його необхідної витрати. Також можливе вирішення завдання вибору оптимального значення коефіцієнта витрати повітря, передбачуваних максимальних продуктивностей вентилятора і димососа, що потрібно для вибору конкретного обладнання.

Визначення витрати природного газу для підсвічування

Нижче проілюстровано рішення задачі визначення питомих витрат природного газу на підсвічування залежно від теплоти згоряння вхідного ТПВ для умов заводу «Енергія» (м. Київ). Технологічний процес налагоджений таким чином, що при теплоті згоряння ТПВ 6900 кДж/кг (1650 ккал/кг) і більше вдається реалізувати топковий процес без витрачання природного газу на підсвічування при гарантованій підтримці температури в топці на заданому рівні 850 ° С. При подальшому зниженні теплоти згоряння ТПВ та роботі з тими ж значенням коефіцієнта витрати повітря з'являється необхідність в додатковому спалюванні природного газу. Проведення обчислень для теплоти згоряння від 6900 кДж/кг до 5230 кДж/кг (1250 ккал/кг) за допомогою розробленого розрахункового комплексу дозволило отримати результати, представлені на рис 3.4.

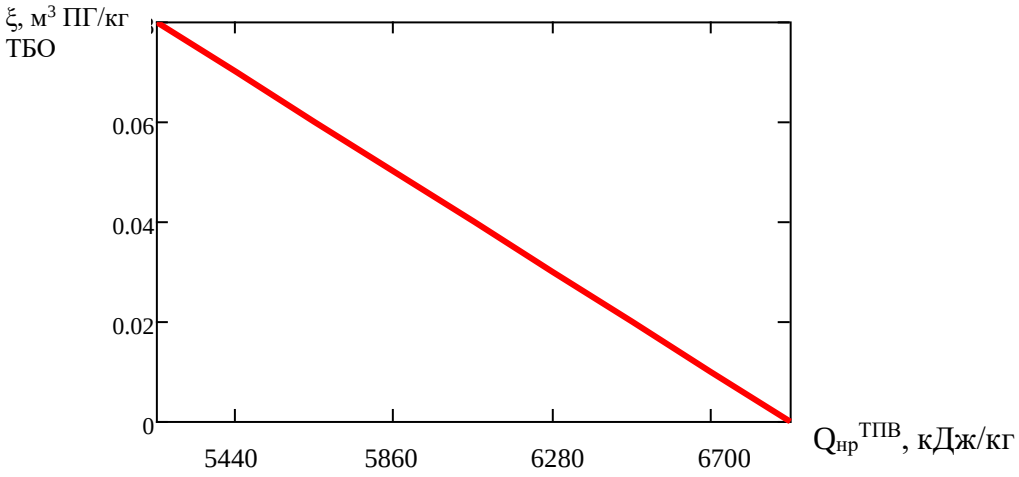


Рисунок 3.4 – Залежність питомої витрати природного газу на підсвічування від теплоти згоряння ТПВ

Для додаткового розкриття можливостей розрахункової моделі проведена серія чисельних експериментів по дослідженню впливу величини коефіцієнта витрати повітря на температуру в топці. За вихідну точку для розрахунків обрано випадок з теплотою згоряння ТПВ 6900 кДж/кг з базовим значення коефіцієнта витрати повітря 2.23 та температурою підігріву повітря 180°С. Далі розрахунки проводилися для ряду точок зі зниженим значенням α в діапазоні від 2,23 до 1,7 (рис. 3.5). При цьому для розуміння ступеня впливу α на температурний стан топки було знято обмеження на максимальне значення температури в топці.

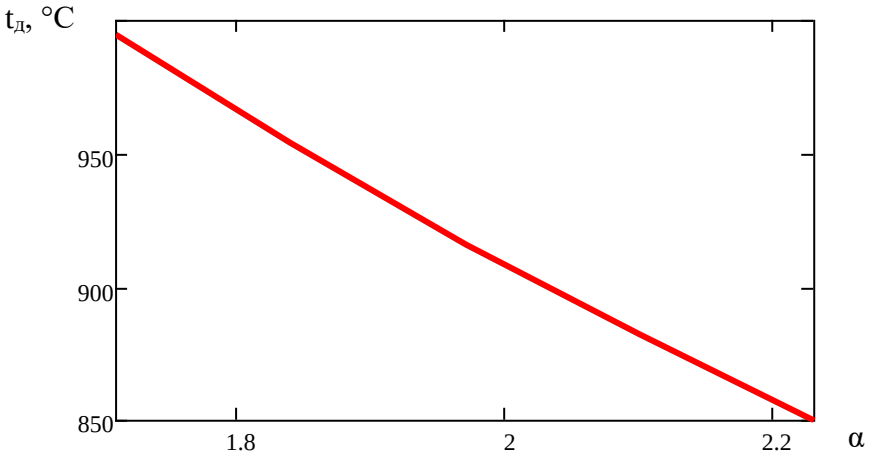


Рисунок 3.5 – Залежність температури в топці від значення коефіцієнта витрати повітря для випадку спалювання ТПВ з теплотою згоряння 6900 кДж кг без використання природного газу для підсвічування

Аналіз результатів показує, що зміна коефіцієнта витрати повітря в допустимих межах (які гарантують повне спалювання ТПВ і максимально можливе придушення утворення шкідливих сполук) є ефективним інструментом для управління температурним станом топки.

Також досліджено влив температури підігріву повітря шляхом проведення наступної серії чисельних досліджень: для ряду температур підігріву повітря в діапазоні 20..380°С при теплоті згоряння ТПВ 6900 кДж/кг за допомогою розрахункової моделі визначалися коефіцієнти витрати повітря які б забезпечили заданий рівень температури в топці 850°С. Результати досліджень представлено на рис 3.6.

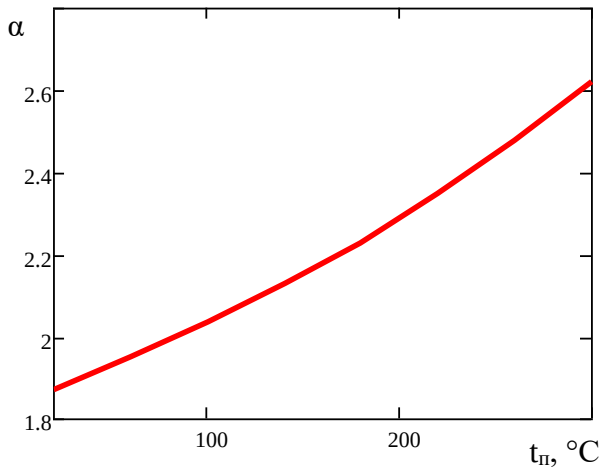


Рисунок 3.6 – Залежність раціонального значення коефіцієнту витрати повітря від температури підігріву повітря при теплоті згоряння ТПВ 6900 кДж/кг

З аналізу даних на рис. 3.6 витікає, що збільшення температури підігріву повітря дозволяє працювати з більшими значеннями коефіцієнту витрати повітря. Тобто за інших рівних умов при незмінному значенні коефіцієнта витрати повітря збільшення температури підігріву повітря буде призводити до підвищення температурного рівня в топці.

Отже підсумовуючи результати попередніх чисельних досліджень можна зробити висновок, що основними факторами які впливають на температурний рівень в топці при заданому тепловому навантаженні котла

є теплота згоряння ТПВ $Q_{нр}$, коефіцієнт витрати повітря α та температура підігріву повітря $t_п$, що направляється для спалювання ТПВ.

Отже мова йде про існування наступної залежності:

$$t_д = f(Q_{нр}, \alpha, t_п, k_{пир}).$$

На практиці дозволений діапазон температурного рівня в топці є досить обмеженим і в якості раціонального значення приймається $t_д$=850°С. Пірометричний коефіцієнт залежить від конструкції топки та режиму експлуатації. При адаптації створеної розрахункової моделі до умов сміттєспалювального заводу «Енергія» було отриманий діапазон зміни $k_{пір}$, що становить від 0,735 (для номінального режиму експлуатації) до 0,9 (для мінімальної сталої потужності).

Науковий та практичний інтерес становить пошук залежностей наступного типу [117]:

$$Q_{нр} = f_1(\alpha, t_п)$$

$$\alpha = f_2(Q_{нр}, t_п)$$

$$t_п = f_3(Q_{нр}, \alpha).$$

Залежності будуються таким, чином щоб при комбінаціях $Q_{нр}$, α, $t_п$ отримувати температурний рівень в топці 850°С. Ці залежності треба отримати для різних навантажень топки, що буде враховано за допомогою значення $k_{пір}$. В цій роботі обрано два значення $k_{пір}$, для яких отримано рівняння регресії: 0,735 та 0,9. В повній мірі отримані рівняння відповідатимуть конструкції топки заводу «Енергія», але оскільки вона є досить типовою, вони зможуть з деякою умовністю використовуватися для інших топок спалювання ТПВ, що мають подібну конструкцію.

Для конструювання шуканих залежностей в кожному випадку використано алгоритм:

– обрано комбінації значень аргументів, які охоплюють важливі для практики діапазони зміни відповідних технологічних параметрів;

– для обраних комбінацій аргументів за допомогою розрахункової моделі ітераційним методом отримано значення величин, обраних в якості функцій, таких щоб температурний рівень в топці складав 850 °С;

– отримані дані у вигляді масиву значень функції та матриці комбінацій аргументів спільно оброблено за допомогою методів математичної статистики в середовищі сучасного інженерно-обчислювального пакету в результатів чого отримано відповідні рівняння регресії.

Залежність необхідної теплоти згоряння ТПВ (кДж/кг) для забезпечення необхідного температурного рівня в топці для довільних значень коефіцієнту витрати повітря та температури підігріву повітря:

– для значення $k_{пир}$=0,735

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

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

Графічну інтерпретацію рівняння представлено на рис 3.7.

– для значення $k_{пир}$=0.9

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

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

Графічну інтерпретацію рівняння представлено на рис 3.8.

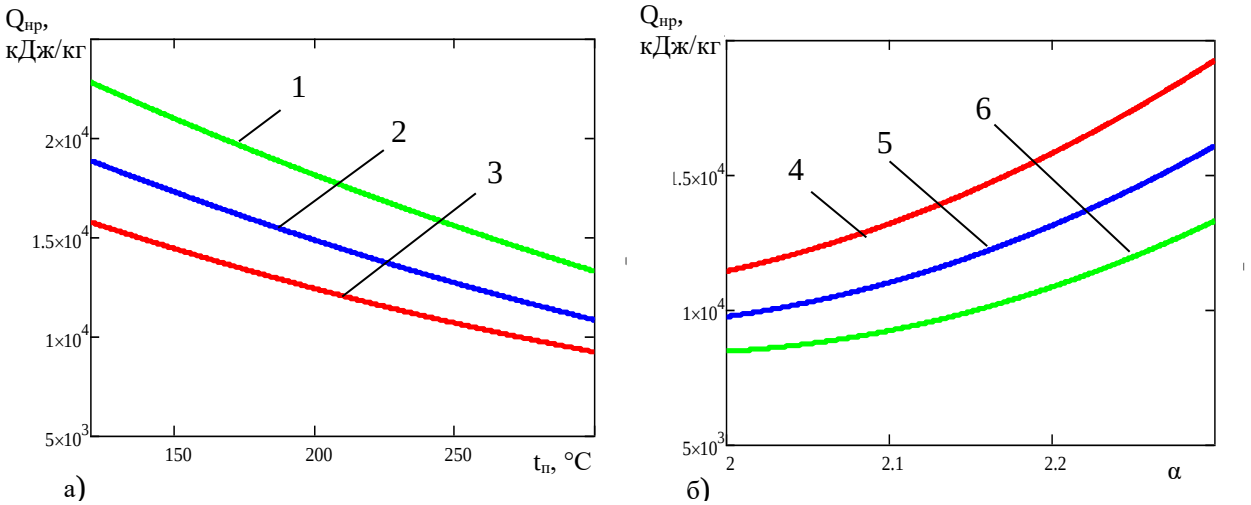


Рисунок 3.7 – Графічна інтерпретація залежності $Q_{нр} = f_1(\alpha, t_п)$ для значення $k_{пир}$=0.735 а) для фіксованих значень коефіцієнту витрати повітря 1 – α=2,3; 2 – α=2,2; 3 – α=2,1; б) для фіксованих значень температури підігріву повітря 4 – $t_п$=180°С, 5 – $t_п$=240°С, 6 – $t_п$=300°С

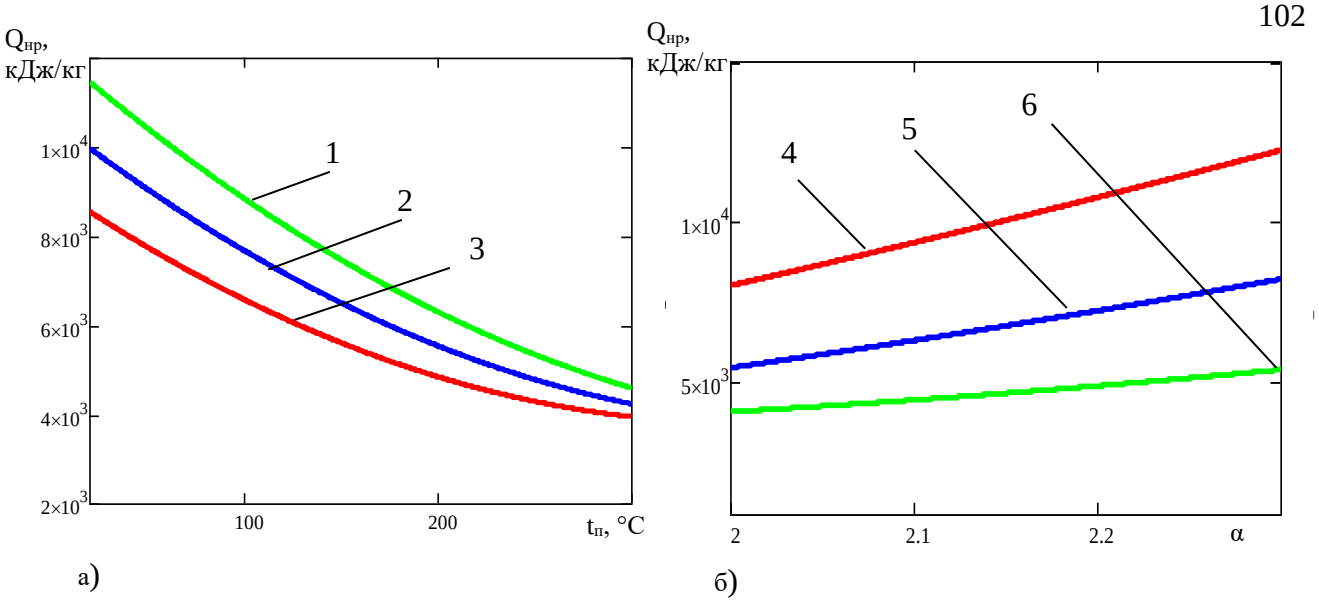


Рисунок 3.8 – Графічна інтерпретація залежності $Q_{нр} = f_1(\alpha, t_п)$ для значення $k_{пир}$=0,9 а) для фіксованих значень коефіцієнту витрати повітря 1 – α=2,2; 2 – α=2,1; 3 – α=2; б) для фіксованих значень температури підігріву повітря 4 – $t_п$=40°C, 5 – $t_п$=160°C, 6 – $t_п$=280°C

Залежність необхідної температури підігріву ТПВ (°C) для забезпечення необхідного температурного рівня в топці для довільних значень коефіцієнту витрати повітря та теплоти згоряння ТПВ:

– для значення $k_{пир}$=0,735

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

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

Графічну інтерпретацію рівняння представлено на рис 3.9.

– для значення $k_{пир}$=0,9

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

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

Графічну інтерпретацію рівняння представлено на рис 3.10.

Залежність необхідного коефіцієнту витрати повітря для забезпечення необхідного температурного рівня в топці для довільних значень коефіцієнту температури підігріву повітря та теплоти згоряння ТПВ:

– для значення $k_{пир}$=0,735

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

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

Графічну інтерпретацію рівняння представлено на рис 3.11.

– для значення $k_{пир}$=0.9

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

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

Графічну інтерпретацію рівняння представлено на рис 3.12.

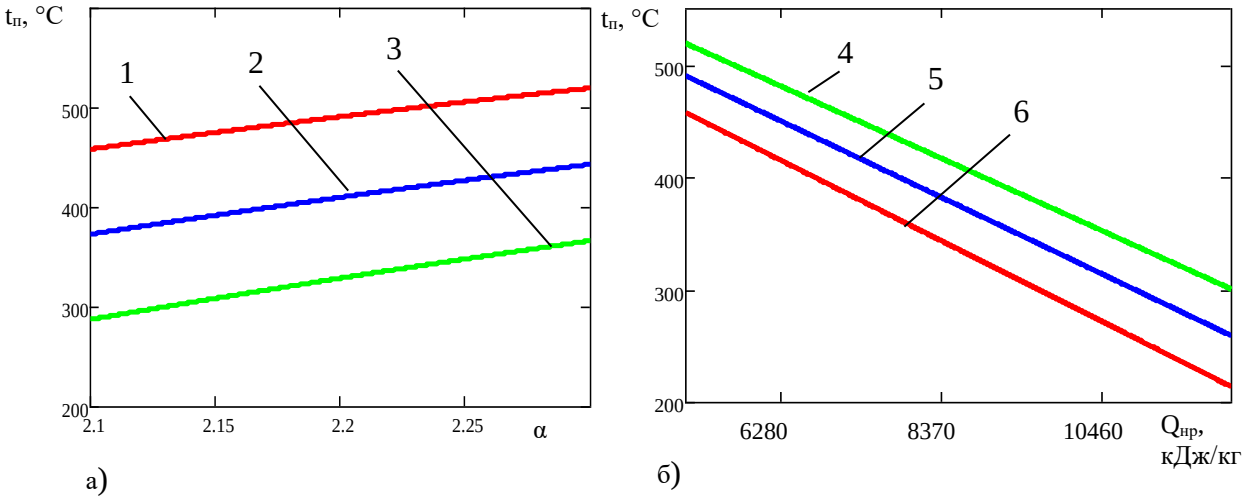


Рисунок 3.9 – Графічна інтерпретація залежності $t_п = f_2(Q_{нр}, \alpha)$ для значення $k_{пир}$=0.735

а) для фіксованих значень теплоти згоряння ТПВ, кДж/кг 1 – $Q_{нр}$=5000, 2 – $Q_{нр}$=7500, 3 – $Q_{нр}$=10000; б) для фіксованих значень коефіцієнту витрати повітря 4 – α=2,3, 5 – α=2,2, 6 – α=2,1

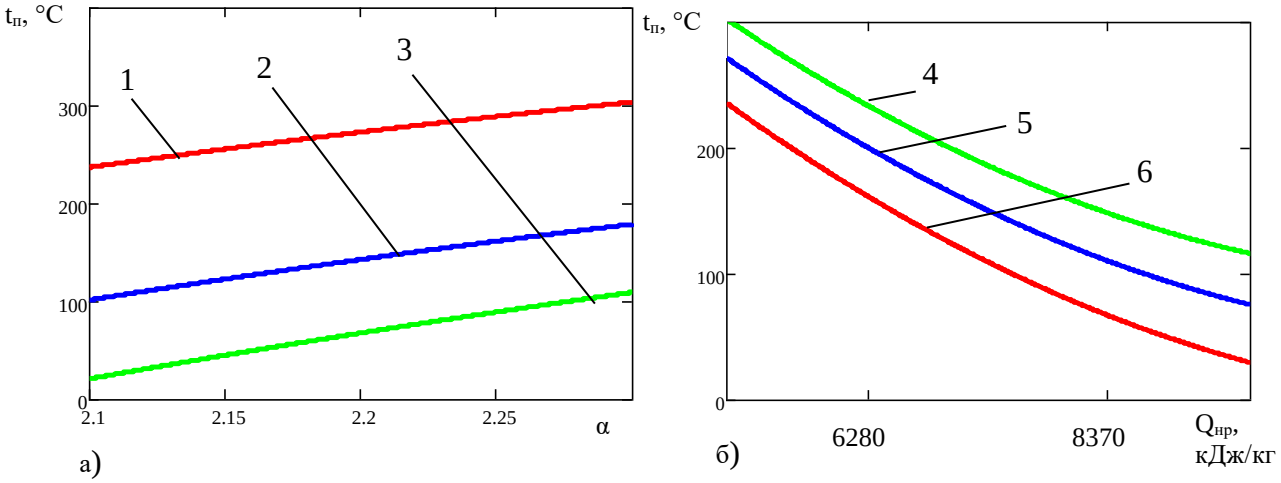


Рисунок 3.10 – Графічна інтерпретація залежності $t_п = f_2(Q_{нр}, \alpha)$ для значення $k_{пир}$=0.9

а) для фіксованих значень теплоти згоряння ТПВ, кДж/кг 1 – $Q_{нр}$=5000, 2 – $Q_{нр}$=7500, 3 – $Q_{нр}$=10000; б) для фіксованих значень коефіцієнту витрати повітря 4 – α=2,3, 5 – α=2,2, 6 – α=2,1

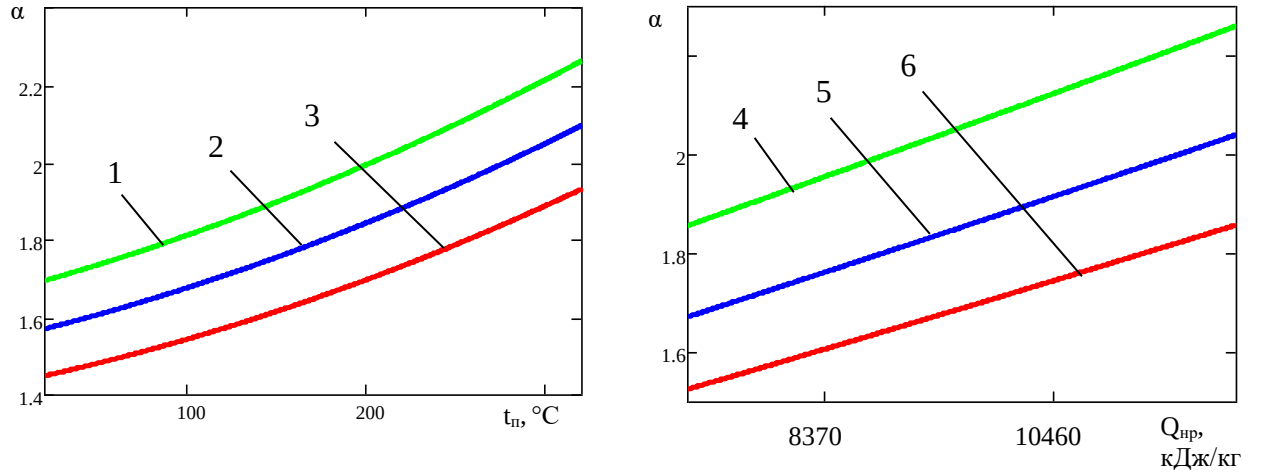


Рисунок 3.11 – Графічна інтерпретація залежності $\alpha = f_3(t_п, Q_{нр})$ для значення $k_{пир}$=0.735 а) для фіксованих значень теплоти згоряння ТПВ, кДж/кг 1 – $Q_{нр}$=11000, 2 – $Q_{нр}$=9000, 3 – $Q_{нр}$=7000; б) для фіксованих значень температури підігріву повітря, °С 4 – $t_п$=280 , 5 – $t_п$=180, 6 – $t_п$=80

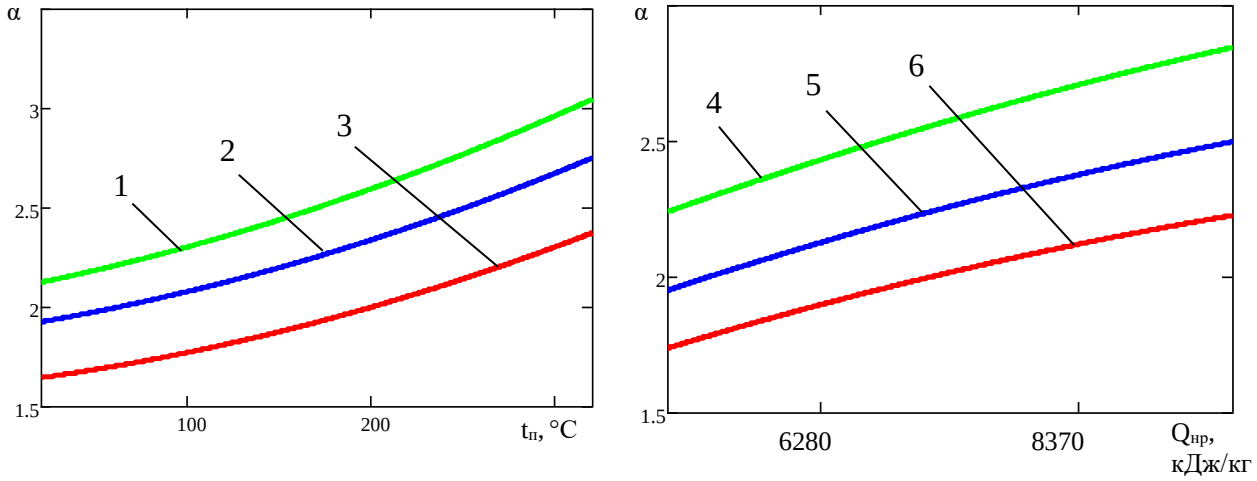


Рисунок 3.12 – Графічна інтерпретація залежності $\alpha = f_3(t_п, Q_{нр})$ для значення $k_{пир}$=0.9 а) для фіксованих значень теплоти згоряння ТПВ, кДж/кг 1 – $Q_{нр}$=10000, 2 – $Q_{нр}$=7500, 3 – $Q_{нр}$=5000; б) для фіксованих значень температури підігріву повітря, °С 4 – $t_п$=280 , 5 – $t_п$=180, 6 – $t_п$=80

Перевірку адекватності всіх отриманих рівнянь регресії виконано стандартним чином:

– Знайдено дисперсію адекватності $S^2_{ад} = \sum_{i-1}^{n} (y_i - \hat{y}_i)^2 / f_{ад}$,

- де n–кількість комбінацій аргументів, яким за допомогою розрахункової моделі співставлено значення шуканої величини;

- y_i – значення шуканої величини отримане за допомогою розрахункової моделі (з точки зору побудови рівняння регресії y_i є експериментальним значенням);
- $\hat{y}_i$ – значення шуканої величини отримане за допомогою рівняння регресії;
- $f_{ад}$ =n-*l* –кількість ступенів свободи;
- *l* – кількість коефіцієнтів рівняння регресії (для всіх отриманих в цьому розділі рівнянь регресії *l*=6);

– Знайдено дисперсію відтворюваності $S_в^2 = (\Delta y_{пред}/2)^2$,

- де $\Delta y_{пред}$ – межове значення абсолютної похибки визначення шуканої величини за допомогою ітераційної процедури розрахункової моделі;

– Обчислено розрахункове значення критерію Фішера $F = S_{ад}^2/S_в^2$;

– Обрано відповідне табличне значення критерію Фішера для довірчої ймовірності 0,955 $F_\alpha(f_{ад}, f_в)$, де $f_в$ – число ступенів свободи для дисперсії відтворюваності. В даному випадку оскільки паралельні чисельні експерименти з отримання шуканої величини за допомогою розрахункової моделі не проводились $f_в$ прийнято рівним ∞;

– Зіставлено значення розрахункового та табличного значень критерію Фішера.

Для всіх отриманих рівнянь регресії виконується умова $F < F_\alpha$, тобто з точки зору математичної статистики всі отримані рівняння є адекватними. Аналіз отриманих рівнянь та їх графічної інтерпретації також свідчить про їх відповідність логіці протікання процесу. Так при номінальному тепловому навантаженні котла, що спалює ТПВ, а отже й топки ($k_{пір}$=0,735) умови підтримання заданого температурного рівня в топці є більш важкими, тобто за інших рівних умов необхідно мати біліші значення теплоти

згоряння ТПВ, або менші значення коефіцієнтів витрати повітря, або більші значення температури підігріву повітря.

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

3.3 Висновки до розділу

1. При спалюванні модельних наважок ТПВ зі складом, що відповідає статистичним даним щодо вмісту основних компонентів ТПВ в м. Київ за всі сезони 2016 р. Встановлено тепловиділення при спалюванні наважок як з їх реальною вологістю, так і в повітряно-сухому стані. Всі встановлені дані з досить високою точністю кореспондуються з прогнозними розрахунковими значеннями.

2. Для жодного з досліджених варіантів на базі експериментального котла-калориметра не вдалося реалізувати автогоріння ТПВ, хоча з точки зору діаграми Таннера для використаного складу ТПВ в повітряно-сухому стані воно є можливим. Цей 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.

3. Для скорочення використання додаткового палива при спалюванні ТПВ, та підвищення ефективності використання енергетичного потенціалу ТПВ, необхідно проводити спалювання ТПВ з меншим вмістом вологи. Найбільш ефективним способом зниження вологості ТПВ є оптимізація організації процесу на стадії збирання відходів, наприклад, шляхом використання закритих контейнерів, які розташовані під навісами. Більш реальним для умов України є організація процесу зменшення вмісту вологи з використанням дренажу в бункері, та підсушування ТПВ перед подачею до котла, з використанням зокрема теплоти димових газів, тощо.

4. Адаптація створеної в дисертації розрахункової моделі проведена шляхом визначення підстроєчного значення пірометричного коефіцієнта для різних режимів експлуатації. Для номінальних умов експлуатації значення $k_{пір}$ становить 0,735. Визначення $k_{пір}$ для інших умов експлуатації котла-утилізатора, що спалює ТПВ (менші теплоти згоряння ТПВ і більш низькі теплові навантаження котла) показали діапазон зміни $k_{пир}$ від 0,735 до 0,9.

5. 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. Так, при зміні теплоти згоряння ТПВ від 6900 кДж/кг до 5230 кДж/кг при коефіцієнті витрати повітря 2,23 та температурі підігріву повітря 180°С питома витрата додаткового природного газу майже лінійно змінюється від 0 до 0,08 $м^3$/кг

6. Шляхом проведення ряду чисельних експериментів та аналізу їх результатів обґрунтовано високий ступінь впливу коефіцієнта витрати повітря на температурний стан топки за інших рівних умов. 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 витрати повітря від 2,23 до 1.7 призводить до підвищення температури в топці від 850 до 990°С.

7. Аналогічним чином обґрунтовано високий ступінь впливу температури підігріву повітря на процес спалювання ТПВ. Так для теплоти згоряння ТПВ 6900 кДж/кг встановлено, що при зміні температур підігріву повітря від 20 до 380°С раціональні значення коефіцієнту витрати повітря, при яких буде забезпечено заданий температурний рівень в топці (850°С) за залежністю, близької до лінійної міняються від 1,87 до 2,62.

8. Отримано дві серії рівнянь регресії для номінального теплового навантаження котла, що спалює ТПВ, ($k_{пир}$=0,735) та сталого пониженого

навантаження ($k_{пір}$=0,9), які встановлюють залежності необхідної теплоти згоряння ТПВ для забезпечення необхідного температурного рівня в топці для довільних значень коефіцієнту витрати повітря та температури підігріву повітря; необхідної температури підігріву ТПВ для забезпечення необхідного температурного рівня в топці для довільних значень коефіцієнту витрати повітря та теплоти згоряння ТПВ; необхідного коефіцієнту витрати повітря для забезпечення необхідного температурного рівня в топці для довільних значень температури підігріву повітря та теплоти згоряння ТПВ. Адекватність отриманих рівнянь регресії обґрунтовано за допомогою методів математичної статистики. Графічний аналіз рівнянь регресії показав, що вони добре кореспондуються з логікою протікання процесу спалювання ТПВ: при більших теплових навантаженнях котла для забезпечення заданого температурного рівня в топці за інших рівних умов необхідно мати біліші значення теплоти згоряння ТПВ, або менші значення коефіцієнтів витрати повітря, або більші значення температури підігріву повітря.

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

РОЗДІЛ 4
СИСТЕМА ДІАГНОСТИКИ СПАЛЮВАННЯ ТПВ ТА ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ

4.1 Створення системи діагностики для визначення теплоти згоряння ТПВ в режимі реального часу

У першому розділі роботи показана доцільність визначення рівня енергоефективності процесу спалювання ТПВ з використанням систем діагностики.

Однак в разі обладнання, що спалює ТПВ, відомі розробки в цій галузі не можуть бути використані без додаткового перегляду, оскільки в загальному випадку моментальні значення теплоти згоряння ТПВ є невідомими. Таким чином, навіть при відомій масовому витраті ТПВ, що надходить на спалювання, немає можливості визначення основного компонента прибуткової частини теплового балансу - надходження теплоти з паливом.

В даному розділі роботи створюється алгоритм, який би дозволяв в режимі реального часу з достатньою точністю визначати склад і теплоту згоряння вхідного ТПВ і, таким чином, робив би можливим застосування розробок з визначення і аналізу моментальних теплових балансів і встановлення рівня енергетичної ефективності процесу [118].

Попередній аналіз всіх можливих варіантів досягнення поставленої мети дозволив зробити висновок, що, мабуть, єдиним способом є визначення шуканих значень на підставі розрахункової обробки виміряних величин, що характеризують склад продуктів згоряння, в режимі реального часу.

Відома методика розрахунку процесу згоряння твердого палива відомого складу ($C_т^р, H_т^р, S_т^р, O_т^р, N_т^р, W_т^р$) представлена наступним набором залежностей [115]:

– визначення теоретично необхідної для горіння 1 кг ТПВ кількості кисню (2.8);

- визначення теоретично необхідної для горіння 1 кг ТПВ кількості вологого повітря (2.9);

- визначення дійсної кількості вологого повітря для горіння 1 кг ТПВ (2.10);

- визначення виходу компонентів продуктів згоряння при спалюванні 1 кг ТПВ (2.11-2.15);

- визначення загальної кількості продуктів згоряння від спалювання 1 кг ТПВ (2.16);

- визначення процентного складу продуктів згоряння.

Якщо необхідно врахувати механічний недопал використовується підхід, розроблений у другому розділі, пов'язаний з використанням величини $\Delta C_{нед}$.

На базі залежностей (2.8-2.16) можна скласти наступну систему рівнянь:

$$V_{пз}^{ТПВ} = V_{CO2}^{ТПВ} + V_{H2O}^{ТПВ} + V_{SO2}^{ТПВ} + V_{N2}^{ТПВ} + V_{O2}^{ТПВ} =$$

$$0.0187 \cdot C_т^р + 0.112 \cdot H_т^р + 0.0124 \cdot W_т^р + 0.001242 \cdot d_{вл} + 0.007 \cdot S_т^р + 0.008 \cdot N_т^р +$$

$$+ 0.79 \cdot \alpha \cdot \frac{V_{O2\,теор}^{ТПВ}}{k_{O2}} + k_{O2} \cdot (\alpha - 1) \cdot \frac{V_{O2\,теор}^{ТПВ}}{k_{O2}} \qquad (4.1)$$

$$\%O_2 = \frac{k_{O2} \cdot (\alpha - 1) \cdot \frac{V_{O2\,теор}^{ТПВ}}{k_{O2}}}{V_{пс}^{ТБО}} \cdot 100 \qquad (4.2);$$

$$\%N_2 = \frac{0.008 \cdot N_т^р + 0.79 \cdot \alpha \cdot \frac{V_{O2\,теор}^{ТПВ}}{k_{O2}}}{V_{пс}^{ТБО}} \cdot 100 \qquad (4.3);$$

$$\%H_2O = \frac{0.112 \cdot H_т^р + 0.0124 \cdot W_т^р + 0.001242 \cdot d_{вл}}{V_{пс}^{ТБО}} \cdot 100 \qquad (4.4);$$

$$\%CO_2 = \frac{0.0187 \cdot C_т^р}{V_{пс}^{ТБО}} \cdot 100 \qquad (4.5);$$

$$\%SO_2 = \frac{0.007 \cdot S_т^р}{V_{пс}^{ТБО}} \cdot 100 \qquad (4.6)$$

У першому наближенні була розглянута можливість розв'язання зворотної задачі. Шукані величини $C_т^р, H_т^р$, $S_т^р$, $O_т^р$, $N_т^р$, $W_т^р$ визначаються в результаті рішення системи, представленої рівняннями (4.1-4.6), при цьому аргументи для визначення шуканих величин ($V_{пс}^{ТПВ}$ і склад продуктів згоряння: $\%CO_2$, $\%H_2O$, $\%SO_2$, $\%O_2$, $\%N_2$) встановлюються за допомогою інформаційно-вимірювальної системи.

Аналіз системи рівнянь показує, що вона є неповною. По суті справи рівняння (4.1) цілком входить в знаменники виразів (4.2-4.6) і тому не може вважатися самостійним рівнянням. Спроби розгляду такої системи рівнянь за допомогою стандартних інженерно-обчислювальних пакетів вказали на неможливість отримання її стабільного рішення; істотну залежність результатів від значень початкового наближення шуканих величин і порядку їх запису в векторі результатів. При цьому цілком можливо отримання результатів, які не мають фізичного сенсу: деякі з шуканих величин можуть мати негативне значення.

З метрологічної точки зору недоліком такого підходу є необхідність вимірювання концентрацій мінімум п'яти компонентів продуктів згоряння (шостий може бути визначений шляхом вирахування зі 100 відсотків п'яти визначених концентрацій). Також досить проблемним є визначення величини $V_{пс}^{ТПВ}$, оскільки, з одного боку, для розрахунків необхідна витрата, приведена до н.ф.у., тобто необхідне проведення корекції, а з іншого боку, вимір необхідно проводити для неочищеного газу, що ускладнює умови експлуатації чутливого елемента.

У зв'язку з цим зусилля були сконцентровані на створенні системи, що завжди дає стійке рішення, для забезпечення роботи якої потрібно було б отримувати меншу кількість вимірювальної інформації.

Для вирішення цього завдання спочатку були проаналізовані реакції горіння компонентів ТПВ:

$$C+O_2=CO_2;$$

$$2H+1/2O_2=H_2O;$$

$$S+O_2=SO_2.$$

Як бачимо, реакції горіння вуглецю і сірки протікають без зміни обсягу газоподібних компонентів, а реакція горіння водню супроводжується подвоєнням обсягу. Також до складу продуктів згоряння переходить азот палива. Що стосується поведінки кисню, що входить до складу ТПВ, то з точки зору матеріального балансу для обчислень можна прийняти наступну схему: він виділяється в газоподібну фазу, з'єднується з киснем повітря, а далі від загальної кількості кисню віднімається частина, необхідна для горіння ТПВ. Таким чином, маючи точну виміряне значення питомої витрати повітря $V_в$, можна скласти розрахункове вираз, що відображає залежність обсягу продуктів згоряння від вмісту ($H_т^р$, $O_т^р$, $N_т^р$, $W_т^р$):

$$V_{пс}^{ТБО} = V_в + 0{,}056 \cdot H_т^р + 0{,}00124 \cdot W_т^р + 0{,}008 \cdot N_т^р + 0{,}007 \cdot O_т^р .$$

Що стосується сірки, її вміст, як правило, не дуже значно впливає на кількість продуктів згоряння, що утворюються, і тому в першому наближенні величина $S_т^р$ не ввійшла в розрахунковий вираз для визначення $V_{пс}^{ТПВ}$.

Деякий нюанс полягає в тому, що крім вентиляторного повітря, що подається на горіння, мають місце присоси повітря через нещільності топкового простору і в газоходи котла. Коефіцієнт, що показує у скільки разів дійсна кількість повітря, що потрапила до котла-утилізатора, більше витрати вентиляторного повітря з достатньою точністю може бути визначений експериментально. Надалі під $V_в$ розуміється дійсна кількість повітря, що потрапила до котла-інсинератора.

Оскільки поставлена задача зменшення кількості датчиків і обсягу вимірювальної інформації в якості газоподібних компонентів, концентрація яких буде вимірюватися, обрані (CO_2, H_2O и O_2). Оскільки при такому підході система буде складатися з трьох рівнянь, то потрібно намітити три невідомих зі складу ТПВ, які будуть визначатися. Серед таких в даній роботі обрані $C_т^р$, $H_т^р$, $W_т^р$, що в найбільшій мірі чинять вплив на теплоту згоряння ТПВ.

Відношення вмісту кисню та азоту до вмісту вуглецю в робочій масі ТПВ, як правило, знаходиться в вузьких межах і в даній роботі в

розрахункових виразах пропонується замість $O_т^р$ и $N_т^р$ використовувати їх кількості, виражені через $C_т^р$ відповідно 0,625 $C_т^р$ и 0,018 $C_т^р$.

Тоді вихід продуктів згоряння від 1 кг ТПВ може бути виражений наступним чином:

$$V_{пс}^{ТБО} = V_в + 0{,}056 \cdot H_т^р + 0{,}00124 \cdot W_т^р + 1.44 \cdot 10^{-4} \cdot C_т^р + 0{,}00437 \cdot C_т^р .$$

В результаті базова система рівнянь записується в наступній формі:

$$\%H2O = \frac{V_{H2O}}{V_{ПС}} = \frac{0.112 \cdot H_т^р + 0.0124 \cdot W_т^р + 0.001242 \cdot d_{вл}}{V_в + 0{,}056 \cdot H_т^р + 0{,}00124 \cdot W_т^р + 1.44 \cdot 10^{-4} \cdot C_т^р + 0{,}00437 \cdot C_т^р}; (4.7)$$

$$\%O_2 = \frac{V_{O2}}{V_{ПС}} = \frac{V_в \cdot C_{O2}^{вл.в} /100 + 0.00437 \cdot C_т^р - 0.0187 \cdot (C_т^р - \Delta C_{нед}) - 0.056 \cdot H_т^р}{V_в + 0{,}056 \cdot H_т^р + 0{,}00124 \cdot W_т^р + 1.44 \cdot 10^{-4} \cdot C_т^р + 0{,}00437 \cdot C_т^р}; (4.8)$$

$$\%CO_2 = \frac{V_{CO2}}{V_{ПС}} = \frac{0.0187 \cdot (C_т^р - \Delta C_{нед})}{V_в + 0{,}056 \cdot H_т^р + 0{,}00124 \cdot W_т^р + 1.44 \cdot 10^{-4} \cdot C_т^р + 0{,}00437 \cdot C_т^р}, (4.9)$$

де $C_{O2}^{вл.в.}$ – концентрація кисню у вологому повітрі,%, яка визначається як

$$C_{O2}^{вл.в.} = 100 \cdot k_{O2} \cdot \frac{100}{100 + 0.1242 \cdot d_{вл}}.$$

При необхідності система може бути доповнена четвертим рівнянням для концентрації SO_2 і відповідно до складу вимірювальної системи має бути включений прилад для вимірювання концентрації цього компонента.

Для перевірки коректності роботи запропонованої системи діагностики попередньо був заданий склад ТПВ та проведено розрахунок його горіння за стандартною методикою [115].

Прийнято наступний склад ТПВ, узятий на підставі даних роботи [38],%:$C^г$=56 $H^г$=7,5 $O^г$=35 $N^г$=1 $S^г$=0,5 $W^р$=49,3 $A^с$=30.

Коефіцієнти перерахунку з сухого на робочий склад і з горючого на робочий складають відповідно 0,507 і 0,355. З урахуванням цих значень визначено робочий склад ТПВ, що надходить на спалювання,%:$C_т^р$=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.

Виконання розрахунку горіння ТПВ за допомогою залежностей, приведених у другому розділі, дозволило отримати наступні результати для коефіцієнта витрати повітря (з урахуванням присосів) α=1,71:

– теоретично необхідна для горіння 1 кг ТПВ кількість кисню 0,434 $м^3$/кг ТПВ;

- дійсна кількість повітря для спалювання 1 кг ТПВ 3,616 $м^3$/кг ТПВ;
- обсяг продуктів згоряння при спалюванні 1 кг ТПВ 4,466 $м^3$/кг ТПВ;
- відсотковий склад продуктів згоряння: $\%CO_2$=8.135; $\%H_2O$=22.129%, $\%O_2$=7.078%, $\%SO_2$=0.028%, $\%N_2$=62.63%.

Визначені в результаті значення ($\%H_2O$, $\%CO_2$, $\%O_2$, $V_в$) були задані як вхідні до системи діагностики.

В результаті були отримані значення, %: $C_т^р$=19,865; $H_т^р$=2,687; $W_т^р$=48,868.

Таким чином, відносні похибки визначення компонентів, які в найбільшій мірі визначають теплоту згоряння ТПВ, склали:

- по вуглецю -0.045%;
- за воднем 0,939%;
- по волозі -0,876%.

Похибка визначення теплоти згоряння за формулою:

$Q_{нр} = 339 \cdot C_т^р + 1030 \cdot H_т^р - 109 \cdot O_т^р + 109 \cdot S_т^р - 25 \cdot W_т^р$ складає 0,217%.

У роботі досліджена чутливість системи діагностики до погрішностей визначення величин-аргументів за допомогою інформаційно-вимірювальної системи. Вимірювання концентрацій кисню, вуглекислоти та водяних парів в продуктах згоряння запропоновано провести за допомогою датчиків, технічні характеристики яких наведено в Додатках (К, Л). Для витрати повітря розглянуто рівень похибки 2%, для концентрацій газоподібних компонентів з урахуванням важких умов роботи датчиків закладено рівень 5%. Результати цього дослідження систематизовані в Таблиці 4.1

Таблиця 4.1 – Параметрична чутливість розробленої системи діагностики до погрішностей визначення вхідних величин

	Погрішності вимірювання вхідних величин			
	$V_в$ (+2%)	$\%O_2$ (+5%)	$\%H_2O$ (+5%)	$\%CO_2$ (+5%)

$C_т^р$	абс. знач.	20,254	19,975	20,215	20,972
	віднос. погр.	1,958	0,554	1,762	5,573
$H_т^р$	абс. знач.	2,74	2,343	2,496	2,367
	віднос. погр.	1,972	-12,8	-7,1	-11,9
$W_т^р$	абс. знач.	49,851	52,418	56,059	52,272
	віднос. погр.	2,012	7,264	14,72	6,97
$Q_{нр}$	абс. знач.	7062	6514	6645	6812
	віднос. погр.	1,949	-5,96	-4,07	-1,66

Як видно з Таблиці 4.1, похибки визначення концентрацій газоподібних компонентів мають нерівний (проте якісно однаковий) вплив на шукані вмісти вуглецю, водню і вологи в робочій масі. Так, завищення показань по кожному газоподібному компоненту призводить до отримання завищених $C_т^р$ и $W_т^р$ та занижених $H_т^р$. Цікавим є той факт, що для основного показника важливого для роботи системи діагностики (теплоти згоряння вихідного ТПВ) помилки визначення $C_т^р$ и $W_т^р$ та $H_т^р$ 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 показників, які визначаються. Таким чином, завищення $V_в$ призводить до завищення теплоти згоряння, а завищення $\%O_2$, $\%CO_2$, $\%H_2O$ до заниження теплоти згоряння. Цілком очевидно, що заниження показань $V_в$, $C_т^р$, $W_т^р$ и $H_т^р$ призведе до зворотних результатів.

Цікавим для аналізу є випадок коли всі похибки вимірювання вихідних величин виникають одночасно і діють в несприятливому напрямі: заниження $V_в$ і завищення $\%O_2$, $\%CO_2$, $\%H_2O$. Згідно з результатами,

отриманими за допомогою системи діагностики, похибка визначення теплоти згоряння в цьому випадку складе 13.6%. Найбільш істотним прийомом для звуження довірчого інтервалу отриманих результатів є підвищення точності вимірювання величин-аргументів.

Нижче наведено приклад використання системи діагностики для аналізу ефективності роботи котла-інсинератора, який спалює ТПВ (рис 4.1). В якості змінних вихідних даних використовуються вміст у продуктах згоряння (кисню, вуглекислоти і водяної пари). Розглянуто приклад роботи системи діагностики протягом дев'яти годин. Для спрощення розрахункові дані бралися через кожну годину, а точки даних з'єднувалися прямими лініями.

4.2 Аналіз рівня енергоефективності процесу спалювання ТПВ в режимі реального часу

Одним з основних критеріїв енергоефективності спалювання палива в печах і котельному обладнанні є коефіцієнт корисної дії агрегатів. З фізичної точки зору ця величина являє собою корисно використаної частку енергії, що надходить в агрегат з одиницею палива. Інша частина енергії втрачається.

Прямим способом к.к.д. процесу спалювання ТПВ визначається як:

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

де D – паропродуктивність котла, кг/с;

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

G – масова витрата ТПВ, кг/с.

Стосовно до котельного устаткування в загальному випадку розрізняють п'ять статей втрат енергії. Наявність інформації про значення к.к.д. агрегатів, визначене прямим способом спільно з наявністю вимірювальної інформації дозволяє з достатньою точністю визначити значення всіх складових втрат енергії. Це створює передумови для ведення

усвідомленої роботи по зменшенню втрат, перевірці ефективності проведених реконструкцій і налагоджувальних робіт.

Ілюстрація роботи системи діагностики з визначенням поточних значень критеріїв енергоефективності (к.к.д. котлоагрегату) приведена на рис. 4.2 для наступних вхідних даних:

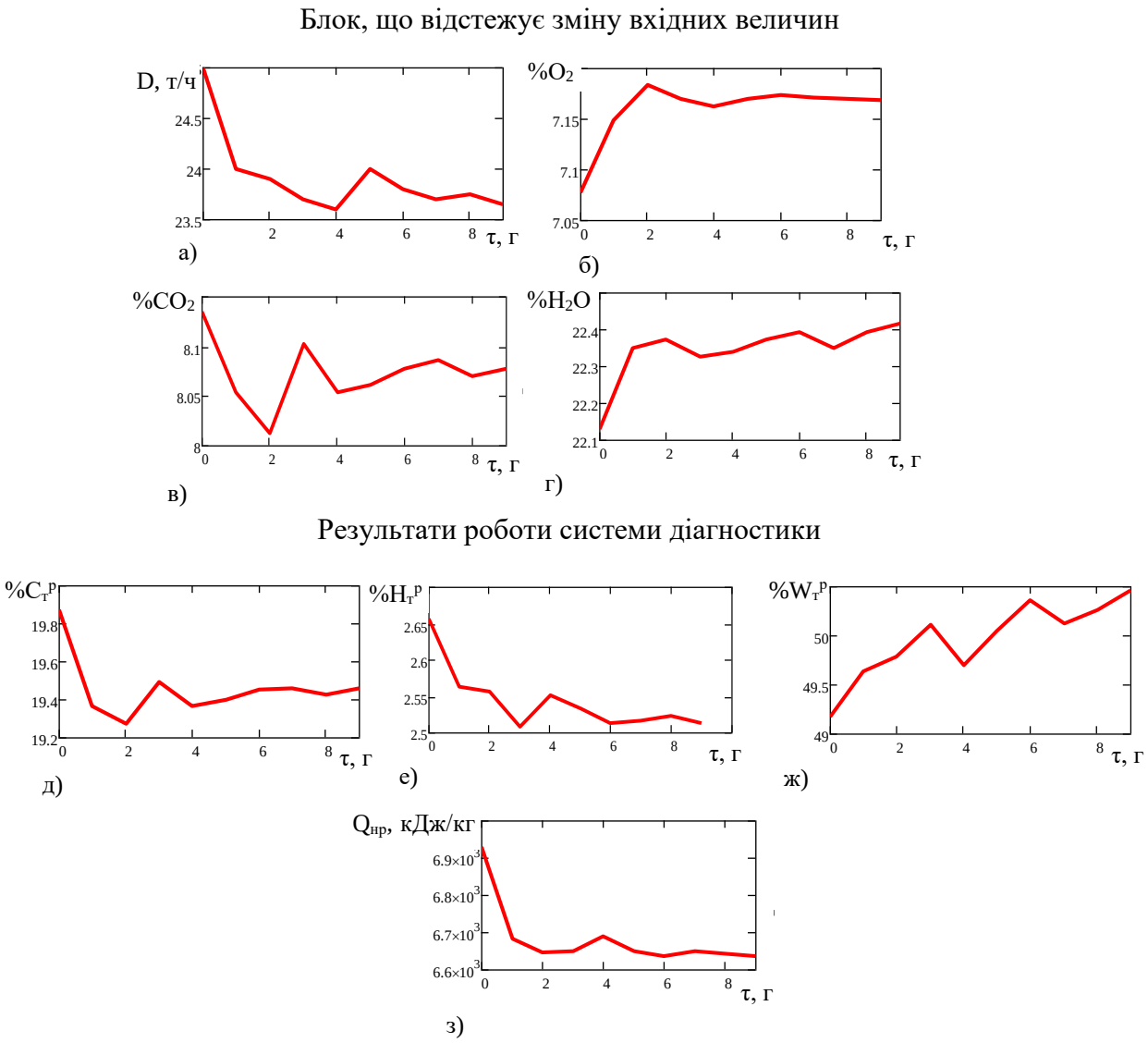


Рисунок 4.1-Приклад роботи системи діагностики, що дозволяє прогнозувати невідомий склад ТПВ та їх теплоту згоряння (а - паропродуктивність котла-інсинератора; б, в, г - зміна концентрацій кисню, вуглекислоти і водяної пари в продуктах згоряння відповідно; д, е, ж - спрогнозовані вмісту вуглецю, водню і вологи в робочій масі ТПВ, що надходить на спалювання; ж - прогнозоване зміна теплоти згоряння ТПВ)

підтримуються постійним і складають 15 т/год і 53200 м³/год відповідно;

- підвищення ентальпії робочого тіла при проходженні котла-утилізатора становить 3100 кДж / кг.

- інші дані ті ж, що для рис. 4.1.

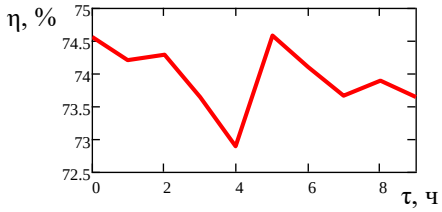


Рисунок 4.2 – Визначення поточних значень к.к.д. устаткування, що використовує ТПВ як паливо

4.3 Обгрунтування вибору програмного середовища для створення емулятора системи діагностики процесів спалювання ТПВ

National Instruments є одним зі світових лідерів в технології віртуальних приладів і в розробці та виготовленні апаратного і програмного забезпечення для систем автоматизованого тестування (рис. 4.3) [119-122].

Рисунок 4.3 – Котування NASDAQ для акцій National Instruments

National Instruments надає інженерам і вченим платформу на основі програмного забезпечення, яка включає модульне обладнання та відповідну систему. Цей підхід дозволяє користувачам визначати, що саме потрібно для

прискорення розробки своєї системи, призначеної для тестування, вимірювання або контролю. Рішення NI допомагають створювати високопродуктивні системи, які перевершують заявлені вимоги і за рахунок модульності адаптуються до змін ринку (рис. 4.4).

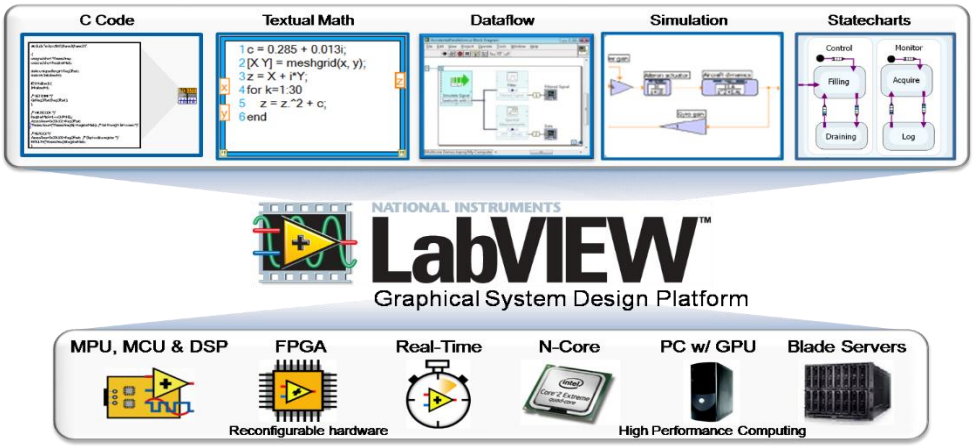


Рисунок 4.4 – Основні можливості LabVIEW

LabVIEW Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench (середа розробки лабораторних віртуальних приладів) являє собою середу графічного програмування, яка широко використовується в промисловості, освіті та науково-дослідних лабораторіях в якості стандартного інструменту для збору даних і управління приладами. LabVIEW - програмне середовище, що застосовується для проведення вимірювань та аналізу отриманих даних.

LabVIEW - кроссплатформове середовище розробки, продукти розробки якої використовуються на комп’ютерах з операційними системами Windows, MacOS, Linux, Solaris і HP-UX. Персональні комп'ютери є більш гнучкими інструментами, ніж традиційні вимірювальні прилади, тому створення власної програми на LabVIEW, або віртуального приладу (ВП, рис.4.5), є більш простим, ніж створення фізичного приладу.

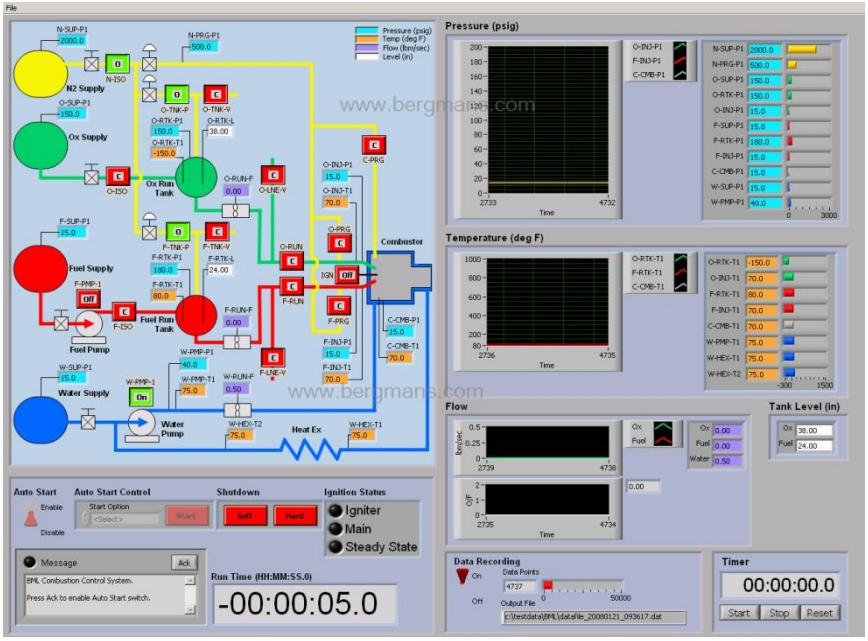


Рисунок 4.5 – Типова мнемосхема на лицевій панелі продукту, створеного в середовищі LabVIEW

Концепція LabVIEW відрізняється від послідовної природи традиційних мов програмування, надаючи розробнику графічну оболонку, яка включає в себе весь набір інструментів, необхідних для збору даних, їх аналізу та представлення отриманих результатів. За допомогою графічної мови програмування LabVIEW, є можливість програмувати завдання з графічної блок-діаграмми, яка компілює алгоритм в машинний код. LabVIEW вирішує завдання різного типу, витрачаючи менше часу і ресурсів у порівнянні з написанням традиційного програмного коду.

За межами лабораторій середовище LabVIEW знаходить застосування в найрізноманітніших сферах людської діяльності. Відповідно до своєї назви вона спочатку використовується в дослідницьких лабораторіях, і в даний час є популярним програмним пакетом як в лабораторіях фундаментальної науки (наприклад, Lawrence Livermore, Argonne, Batelle, Sandia, Jet Propulsion Laboratory, White Sands і Oak Ridge в США , CERN (рис 4.6) в Європі), так і в галузевих промислових лабораторіях. Збільшується застосування LabVIEW в освіті для університетських лабораторних.

На даний момент розробники створюють віртуальні прилади, що допускають віддалене управління і спостереження через Internet. Вимірювальні системи на основі віртуальних приладів відрізняються своєю багатофункціональністю, гнучкістю і низькою вартістю як з точки зору обладнання, так і з точки зору витрат часу на розробку.

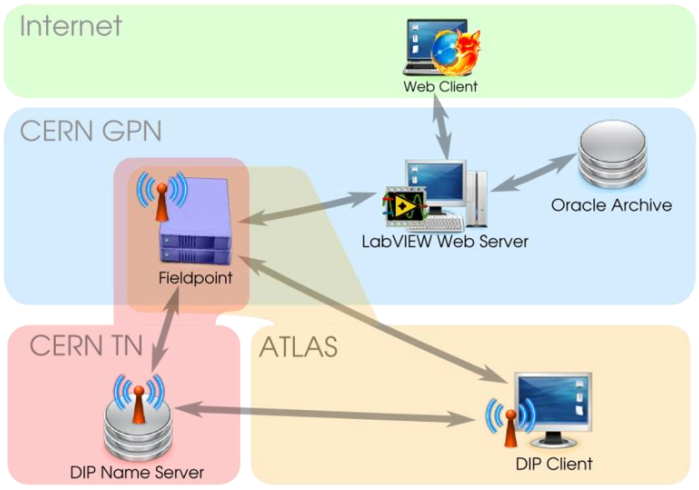


Рисунок 4.6 – Місце LabVIEW в архітектурі CERN

LabVIEW прискорює впровадження комп'ютера в вимірювальні системи (рис. 4.7) - і не тільки тому, що полегшує проведення вимірювань, він також дає можливість проаналізувати виміряні величини, відобразити їх на графіках і в звітах і при бажанні опублікувати.

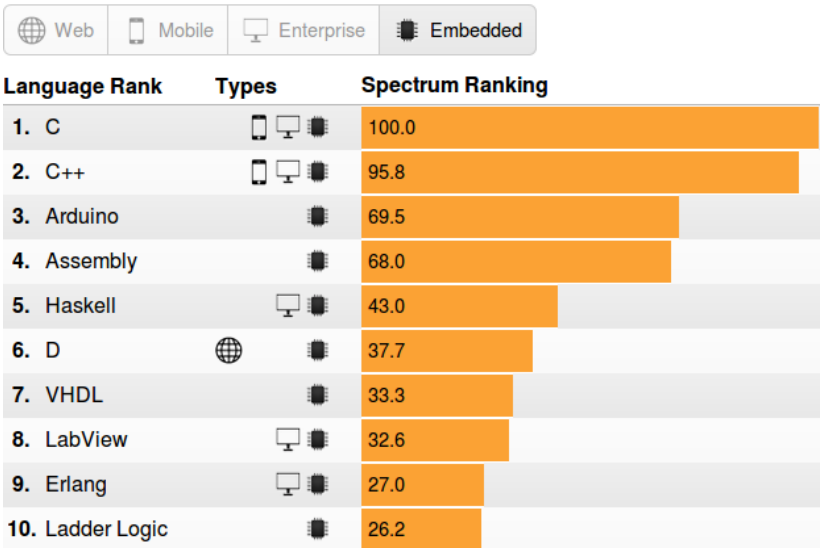


Рисунок 4.7 – Місце LabVIEW серед мов програмування, що використовуються для вимірювальних та керуючих приладів

Після вимірювання і аналізу будь-якої величини наступним логічним кроком є управління, тобто зміна певних параметрів в залежності від отриманих результатів. Наприклад, вимірявши температуру об'єкта, можна включити пристрій для його охолодження або нагрівання. LabVIEW значно полегшує вирішення цього завдання: моніторинг і управління процесами є основними функціями цього програмного продукту. Управління процесами може бути прямим або здійснюється через спеціальні логічні контролери (programmable logical controllers - PLC), що прийнято називати диспетчерським управлінням і збором даних (supervisory control and data acquisition - SCADA).

4.4 Створення емулятора системи діагностики процесів спалювання ТПВ в середовищі LabVIEW

На базі системи рівнянь (4.7-4.9) в середовищі LabVIEW створено емулятор системи діагностики. Для дослідження роботи системи користувачем можуть бути задані довільні значення (закони зміни значень) величин аргументів, які також можуть бути модульовані за рахунок накладання погрішностей, наприклад у вигляді шуму. В результаті емулятор видає закон зміни шуканих величин.

Для роботи створеного емулятора вхідними величинами є поточні значення наступних параметрів:

– паропродуктивність котла-утилізатора;

–концентрації кисню, вуглекислоти і водяної пари в продуктах згоряння;

–загальна витрата повітря на топку;

– масова витрата ТПВ.

В системі рівнянь (4.7-4.9) використовується питома витрата повітря, яка знаходиться як відношення повної витрати повітря до масової витрати ТПВ.

В результаті роботи емулятора діагностики видаються результати у вигляді поточних значень наступних величин:

– вміст вуглецю, водню та водяної пари в робочій масі ТПВ;

– теплота згоряння ТПВ;

– моментальне значення к.к.д. топки та котла-інсинератора.

Скріншоти основних вікон програми, що ілюструють її структуру та можливості наведено в Додатках (М, Н, О).

4.5 Висновки до розділу

У даній роботі створено алгоритм, що дозволяє в режимі реального часу з достатньою точністю визначати склад і теплоту згоряння вхідного ТПВ на підставі розрахункової обробки сигналів датчиків про витрату повітря на горіння та концентрації таких компонентів продуктів згоряння як кисень, вуглекислота і водяні пари і, таким чином, робить можливим застосування розробок за визначенням і аналізу моментальних теплових балансів.

При дослідженні параметричної чутливості розробленої системи діагностики показано, що похибки визначення концентрації газоподібних компонентів чинять наступний вплив на результати: при завищенні виміряних концентрацій газоподібних компонентів вміст $C_т^р$ и $W_т^р$ є завищеним, а $H_т^р$ – заниженим. При цьому похибки визначення $C_т^р$, $W_т^р$ и $H_т^р$ в деякій мірі взаємно компенсуються і при похибці визначення концентрації будь-якого з розглянутих газоподібних компонентів в 5% похибка визначення теплоти згоряння не перевищує 6%. Що стосується похибки визначення витрати повітря, то завищення витрат повітря призводить до завищення всіх шуканих показників.

В якості програмного середовища для створення емулятора системи діагностики на базі створеного в роботі алгоритму обрано середовище розробки лабораторних віртуальних приладів LabVIEW. Створений емулятор робить можливим прогнозування характеристик вхідного ТПВ та к.к.д. агрегату, що його використовує, в режимі реального часу.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ДО РОБОТИ

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.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Переработка мусора (ТБО) в Европе. URL: http://ztbo.ru/o-tbo/stati/stranni/pererabotka-musora-tbo-v-evrope
2. Глобальная проблема утилизации отходов. URL: http://ultraprogress.ru/problemi-tsivilizatsii/globalnaya-problema-utilizatsii-otchodov.html
3. Экология города (урбоэкология). URL: http://files.school-collection.edu.ru/dlrstore/df5a0beb-109c-475b-8ed3-b0fce13c4e0/ Metod_mat/help/urbo_eco/str6.htm
4. Методы и способы переработки мусора (ТБО). URL: http://ztbo.ru/o-tbo/stati/obshie/metodi-i-sposobi-pererabotki-musora-tbo
5. Технология захоронения ТБО. URL: http://waste-nn.ru/tehnologiya-zahoroneniya-tbo/
6. Гапонов В.Л., Лысова Е.П. Исследование условий и особенностей эксплуатации различных видов полигонов по захоронению твердых отходов производства и потребления. *Электронный научный журнал «Инженерный вест ник Дона»*. 2014. №3. URL: http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2485
7. Абрамкин Н.И., Захарова Р.А., Степанов Р.А. Основные способы утилизации и обезвреживания твердых отходов и перспективы использования геотехнологических методов . *Известия ТулГУ. Науки о Земле*. 2010. №2. С. 3-10.
8. Сидорков А.А. Использование георесурсов карьеров для промышленного компостирования органических отходов. *Известия ТулГУ. Науки о Земле*. 2011. №1. С. 175-184.
9. Ярлыченко С.А. Компостирование органической фракции твердых бытовых отходов с использованием бактериальных добавок. *Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 03.00.07* «Микробиология». Казань, 2008. С. 20.

10. Немировский И.А. Переработка ТБО: проблемы и достоинства. Часть I. *Энергосбережение, энергетика, аудит*. 2011.№6 (88). С. 46-53.
11. Тугов А.Н., Надыров И.И. Опыт работы ВТИ по термической переработке твердых бытовых отходов. *Энергетика и электрификация*. 2002. №7. С. 26-29.
12. Мамаджанов Р.Х., Сидоренко С.Н., Латушкина Е.Н. Экологические аспекты термической переработки твердых бытовых отходов: российский и американский опыт. *Вестник российского университета дружбы народов*. 2014. №6. С. 52-57.
13. Jones J.C. Thermal processing of waste. free e.book: boolboon.com, 2010. 94 p.
14. Харченко Т., Сагайдак Ю. Удосконалення системи переробки твердих побутових відходів в Україні. *Вісник київського національного університету ім. Тараса Шевченка*. 2014. №12(165). С. 41-46.
15. Жуховицкий В.Б., Меллер В.Я., Тугов. А.Н. Утилизация твердых бытовых отходов. Днепропетровск: «Свидлер А.Л.», 2011. С. 546.
16. Тугов А. Н., Эскин Н.Б., Литун Д.С. Проблемы энергетического использования твердых бытовых отходов и внедрение разработок ВТИ на мусоросжигательных заводах . *Электрические станции*. 1996. №7. С. 62-67.
17. Salman Aatif, Muhammad Naeem Arbab. Capacity Estimation of Power Generation from MSW of Peshawar City. *International Journal of Computer Applications*. 2015. № 111 (15). P. 40-45.
18. Малышевский А.Ф. Обоснование выбора оптимального способа обезвреживания твердых бытовых отходов жилого фонда в городах России. *Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации*, 2012. С. 48.
19. Меликов Г.И. Эколого-экономические аспекты утилизации отходов. *Естественные и технические науки*. 2014. №8. С. 42-46.

20. Клинков А.С., Беляев П.С., Однолько В.Г. Утилизация и переработка твердых бытовых отходов. Тамбов, 2015. С. 187.
21. Магера Ю.М. Концепция развития «Завода «Энергия»: ТЭЦ на ТБО. *Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики: Сборник трудов Института промышленной экологии*. Київ, 2016. С. 208-211.
22. Тугов А.Н., Вихрев Ю.В. Опыт США в области использования энергетического потенциала твердых бытовых отходов. *Энергетик*. 2009. № 11. С. 25-29.
23. Тугов А.Н., В.Ф. Москвичев. Использование энергопотенциала твердых бытовых отходов в России и за рубежом. *Энергия: экономика, техника, экология*. 2011. № 8. С. 32-42.
24. Waste-to-energy (municipal solid waste) URL: https://www.eia.gov/energyexplained/index.cfm/data/index.cfm?page=biomass_waste_to_energy
25. Пурим В.Р., Тугов А.Н. Твердые бытовые отходы - топливо для ТЭС малой мощности. *Аква-терм*. 2001. №2. С. 91-93.
26. Тугов А.Н., Е.Н. Зеликов. Пути повышения эффективности выработки электроэнергии на ТЭС, сжигающих ТБО. *Сб. докл. 5-го междунар. конгресса по управлению отходами*. Москва, 2007. С. 285-286.
27. The 25 Leading Companies in Waste to Energy (WTE) 2015 URL: http://www.prnewswire.com/news-releases/the-25-leading-companies-in-waste-to-energy-wte-2015-553011151.html
28. Seltenrich N. Emerging Waste-to-Energy Technologies: Solid Waste Solution or Dead End? *Environ health prospect*. 2016. P. 106-111.
29. Тугов А.Н., Москвичев В.Ф., Федоров Л.Г. Перспективы энергетической утилизации твердых бытовых отходов в России. *Сб. докладов конф. Междунар. ассоциации по твердым отходам (ISWA) «Передовые технологии переработки и захоронения отходов: ориентиры применения и критерии выбора»*, М., 2011.

30. Безрук З.Д., Пореев В.И. Исследование приземных концентраций выбросов мусоросжигательного завода «Энергия». *Проблемы машиностроения*. 2013. Том 16.№6.С. 37-42.

31. Матвеев Ю.Б., Гелетуха Г.Г. Энергетическое использование ТБО, как одно из средств решения проблемы управления отходами в Украине *Сборник статей «Энергия из отходов».* К., 2011. С. 34-40.

32. Тугов А.Н., Литун Д.С., Эскин Н.Б. Комплекс работ по освоению и наладке процессов термической переработки твердых бытовых отходов. *Электрические станции*. 2001. № 7. С. 19-26.

33. Росляков П.В., Изюмов М.А., Тугов А.Н. О выборе оптимальной технологии термической переработки твердых бытовых отходов. *Энергетик*. 1996. № 9. С. 6-12.

34. Пузырев Е.М. Организация топочного процесса в кипящем слое. – Москва, 1990. Т. 3. № 12.С. 36.

35. Тугов А.Н., Рябов Г.А. Современные ТЭС, сжигающие бытовые отходы в циркулирующем кипящем слое (мировой опыт). *Энергохозяйство за рубежом*. 2008. № 5 (240). С. 12-20.

36. Баскаков А.П., Мацнев В.В., Распопов И.В. Котлы и топки с кипящим слоем. Москва, *Энергоатомиздат*, 1996. С. 352 .

37. Лундквист Р.Г. Технология сжигания в циркулирующем кипящем слое *Электрические станции*. 2002. №10. С. 61-67.

38. Серикбаев Н.С., Махамбетова А.К., Жакупаева С.Т. Элементарный состав и низшая теплота сгорания ТБО г. Астана и продуктов его переработки методом пиролиза. *Вестник ЕНУ им. Л.Н. Гумилева*. 2013. №6. С. 228-232.

39. Ильиных Г.В. Оценка теплотехнических свойств твердых бытовых отходов исходя из их морфологического состава. *Вестник ПНИПУ. Урбанистика*. 2013. №3. С.125-136.

40. Рижков С.С., Маркіна Л.М., Лісова А.В. Тверді побутові відходи як сировина для двостадійного процесу термічної деструкції. *Збірник наукових праць НУК*. 2011. №3 С. 140-148.
41. Ильиных Г.В. Использование результатов определения морфологического состава твердых бытовых отходов для обоснования системы обращения с отходами. *Вестник ПНИПУ. Урбанистика*. 2012. №1. С. 35-42.
42. Черп О.М., Виниченко В.Н. Проблема твердых бытовых отходов: комплексный поход. Москва, 1996. С. 229 .
43. Valkenburg C., Walton C.W., Thompson B.L. Municipal Solid Waste (MSW) to Liquid Fuels Synthesis, Volume 1: Availability of Feedstock and Technology. Washington, 2008. P. 72.
44. Estimation of Energy Content of Municipal Solid Waste. URL: http://msw.cecs.ucf.edu/energyproblem.pdf
45. Михайленко В.П., Шмарин С.Л., Хоффманн М. Сезонные колебания состава твердых бытовых отходов как фактор системного обращения с их потоками. *Сборник трудов 8-ой Международной конференции "СОТРУДНИЧЕСТВО ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ОТХОДОВ"* Харьков, 2011. С. 15-25.
46. Дик Э.П., Тугов А.Н., Земсков К.А. Теплотехнические характеристики ТБО г. Москвы, определенные по методике ВТИ. *Сб. докл. 5-го междунар. конгресса по управлению отходами*. Москва, 2007. С. 286-287.
47. Тугов А.Н., Дик Э. П., Соболева А.Н., Зеликов Е.Н. Минеральная часть и теплотехнические характеристики ТБО. Шлакование пароперегревателей котлов, сжигающих ТБО. *Сб. докл. IV науч.-практич. конф. «Минеральная часть топлива, шлакование, загрязнение и очистка котлов».* Челябинск, 2007. Т.1. С. 80-86.
48. Тугов А.Н. Исследование процессов и технологий энергетической утилизации бытовых отходов для разработки отечественной ТЭС на

ТБО. *Автореф. дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук: спец. 05.14.14 «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты»*. Москва, 2012. С. 43.

49. Хеммингер В., Хене Г. Калориметрия. Теория и практика. Москва, 1989. С. 176.
50. Кирьянов К.В. Калориметрические методы исследования. *Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Современные методы исследования новых материалов электроники и оптоэлектроники для информационно-телекоммуникационных систем»*. Нижний Новгород, 2007. С. 76.
51. Семиохин И.А. Физическа химия. *Учебник*. Москва, 2001. С. 272.
52. Komilis D., Kissas K., Symeonidis A. Effect of organic matter and moisture on the calorific value of solid wastes: An update of the Tanner diagram. *Waste Management*. V. 34, Issue 2. P. 249-255.
53. Municipal Solid Waste Incineration. *The International Bank for Reconstruction and Development*, Washington, 1999. P. 112.
54. Тугов А.Н., Литун Д.С., Эскин Н.Б. Комплекс работ по освоению и наладке процессов термической переработки твердых бытовых. *Электрические станции*. 2001. № 7. С. 19-26.
55. Тугов А.Н., Рябов Г.А., Литун Д.С. Опыт наладки и исследований установок для сжигания ТБО. *Энергия из биомассы: сб. докл. Междунар. конф*. Киев, 2004. С. 287-288.
56. Литун Д.С., Тугов А.Н., Эскин Н.Б. Результаты внедрения газового воздухоподогревателя на мусоросжигательном заводе. *Промышленная энергетика*. 1997. № 4. С. 26-29.
57. Тугов А.Н., Москвичев В.Ф., Рябов Г.А. Опыт освоения сжигания твердых бытовых отходов на отечественных ТЭС. *Теплоэнергетика*. 2006. № 7. С. 55-60.

58. Тугов А.Н., Москвичев В.Ф., Смирнов А.Н. Отечественные ТЭС на ТБО. Опыт освоения и пути развития. *Экология и промышленность России*. 2009. № 3. С. 4-7.

59. Изюмов М.А., Супранов В.М., Тугов А.Н. Особенности теплового расчета мусоросжигательных котлов на ПЭВМ с применением программы «TRAKT». *Информационные средства и технологии: сб. докл. между- нар. конф*. Москва, 2001. Т. 2. С. 98-101.

60. Хвостиков А.Г. Исследование термических процессов обезвреживания твердых отходов и совершенствование теплоутилизирующего оборудования. *Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 11.00.11 «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов»*. Ростов-на-Дону, 1998. С. 20.

61. Тугов А.Н., Рябов Г.А., Родионов В.И. Результаты освоения и перспективы использования технологии сжигания отходов в вихревом кипящем слое. *Электрические станции*. 2006. № 6. С. 20-26.

62. Щепилло Л.В. Разработка и исследование энергетических схем предприятий по термической переработке отходов с парогазовым циклом энергопроизводства. *Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 05.14.04 «Промышленная теплоэнергетика»*. Москва, 2005. С. 20.

63. Касимов А.М., Семенов В.Т., Щербань Н.Г., Мясоедов В.В. Современные проблемы и решения в системе управления опасными отходами. Харьков, 2008. С. 510.

64. Грищенко А.В., Н.П. Горох. Технологические основы промышленной переработки отходов мегаполиса. Харьков, 2005. С. 339.

65. Гуляєв В.М. Екологічна біотехнологія. *Системні технології* Дніпропетровськ, 2002. С. 126.

66. Liu A. A, Alic Liu, Fei Ren, Wenlin Yvonne. Review of municipal solid waste environmental standards with a focus on incinerator residues.

International Journal of Sustainable Built Environment. 2015. Volume 4, Issue 2. P. 165-188.

67. Внукова Н.В., Беспалова М.В., Зубова Ю.С., Горох Н.П. Твёрдые бытовые отходы: объективная реальность, проблемы накопления и переработки. *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*. 2008. №43. С. 73-79.
68. Загрязнение окружающей среды. Энергия из отходов. URL: http://www.technopark.by/iccee/eschool/presentations/ recycle
69. Тугов А.Н., Москвичев В. Ф. ТЭС на ТБО - экологические проблемы и их решения. Рециклинг, переработка отходов и чистые технологии. *Сб. материалов 6-й Междунар. науч.-практ. конф*. Москва, 2010. С. 14-19.
70. Тугов А. Н., Москвичев В. Ф. Экологические и энергетические аспекты получения тепловой и электрической энергии из твердых бытовых отходов. *Новини енергетики*. 2011. № 8. С. 33-43.
71. Мамаджанов Р.Х., Латушкина Е.Н. Российско-китайский опыт по обращению с твёрдыми бытовыми отходами. *Рециклинг отходов*. 2014. № 4. С. 24-27.
72. Латушкина Е.Н. Процессы и аппараты защиты окружающей среды. Расчетные работы. Москва, 2017. С. 51.
73. Тугов А.Н., Дик Э.П., Соболева А.Н. Оценка влияния минеральной части отходов на экологические характеристики образующихся при сжигании дымовых газов. *Сб. докл. V науч.-практ. конф. «Минеральная часть топлива, шлакование, очистка котлов, улавливание и использование золы».* Челябинск, 2011. Т I. С. 78-86.
74. Тугов А. Н., Дик Э.П., Соболева А.Н. Оценка влияния минеральной части отходов на содержание в дымовых газах газообразных соединений серы, хлора и фтора. *Электрические станции*. 2011. № 10. С. 15-20.

75. Угначев В.И., Епихин А.Н., Тугов А.Н. Контроль работы газоочистного оборудования на установках для сжигания твердых бытовых отходов. *Теплоэнергетика*. 2001. № 12. С. 52-56.

76. Очистка отходящих газов от диоксинов и фуранов при переработке ТБО. URL: http://ztbo.ru/o-tbo/lit/texnologii-otxodov/ochistka-otxodyashix-gazov-ot-dioksinov-i-furanov-pri-pererabotke-tbo.

77. Basel Convention Secretariat. Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and Their Disposal .*Technical Guidelines on the Environmentally Sound Management of Biomedical and Health-Care Waste*. 2002.UNEP, Geneva.

78. Сжигание отходов: вопросы экологической безопасности. URL: http://www.solidwaste.ru/publ/view/509.html.

79. Базаянц Г.В. Ресурсосберегающие технологии и установки газоочистки и утилизации отходов угольных ТЭС. *дисссертация на соискание ученой степени докт. техн. наук: спец. 05.14.14 «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты»*. Горловка, 2003. С. 360.

80. Тугов А.Н., В.Ф. Москвичев. Методы снижения выбросов оксидов азота на ТЭС, сжигающих твердые бытовые отходы. *Электрические станции*. 2008. № 11. С. 13-17.

81. Ходаков Ю.С. Оксиды азота и теплоэнегетика. Проблемы и решения. Москва, 2001. С. 476.

82. Смирнов Б.Ю., Смирнова С.Б., Альбитер Л.М. Восстановление оксидов азота в отходящих дымовых газах. эколого-экономический анализ. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2012. Т. 14. №5(3). С. 846-849.

83. Warnatz J., Maas U., Dibble R. W. Combustion: Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments. *Pollutant Formation Springer*, 2006. P. 378.

84. Miller J.A., Bowman C.T. Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*. 1989. Vol. 15, №4. P. 287–338.

85. Konnov A.A., Javed M.T., Kassman H., Irfan N. NO_x Formation, Control and Reduction Techniques (англ.) Handbook of Combustion. *Combustion Diagnostics and Pollutants*. Wiley, 2010. P. 439-464.

86. Бородина Е.В. Комплексная очистка дымовых газов, образующихся при термическом обезвреживании твердых бытовых отходов: *Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 03.00.16 «Экология»*. Москва, 2006. С- 26.

87. Бернадинер М.Н. Диоксины при термическом обезвреживании органических отходов. *Экология и промышленность России*. 2010. №2. С. 13-16.

88. Вамболь В.В. Снижение уровня диоксинов при утилизации отходов. *Проблемы безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций: всерос. научн. практ. конф*. Воронеж, 2014. С. 175-177.

89. Гриценко А.М., Макаровский Е.К., Черванев И.В., Шеренков И.А. Управление промышленными отходами. *учебн. пособ в 2 кн., Кн. 1-Ч. 1: Промышленные отходы и окружающая среда в современном мире*.– Харків., 2000. С. 80.

90. Кобрин В.Н., Нечипорук Н.В., Вамболь В.В. Система управления экологической безопасностью при утилизации твердых бытовых и производственных отходов. *Екологічна безпека*. Кременчук, 2014. 2(2014)/18. С. 25-30.

91. Сленкин М.В., Жовнир Н.М., Дрозд К.А. Образование диоксинов при термической переработке твердых бытовых отходов / М.В. Сленкин, URL: http:\waste.ua\cooperation\2005\theses\slenkin.html

92. Винг Цанг, Распад и образование диоксина при горении отходов. *Химическая физика*. 1994. Т. 13. №2. С. 17-33.

93. Федоров Л.А. Диоксины как экологическая опасность: ретроспектива и перспективы. Москва, 1993. С. 266.

94. Тугов А.Н., Москвичев В.Ф., Федоров Л.Г., Соколов Н.С. Методы снижения выбросов диоксинов и фуранов с дымовыми газами на предприятиях, сжигающих твердые бытовые отходы. *Электрические станции*. 2008. № 12. С. 18-23.

95. Шефер Г., Європа в цифрах. *Річник Єврostата 2006-2007*. С. 371.

96. Томас Ф., Детлеф Б. Развитие передовых методологий для мониторинга энергоэффективности на примере украинских пилотных компаний. *Envidatec GmbH*, 2014. С. 104.

97. Тугов А.Н., Зеликов Е.Н. Пути повышения эффективности выработки электроэнергии на ТЭС, сжигающих ТБО. *ВэйстТэк-2007: сб. докл. 5-го междунар. конгресса по управлению отходами*. Москва, 2007. С. 285-286.

98. Тугов А.Н., Дик Э.П., Соболева А. Н. Особенности расчета тепловых потерь от механической неполноты сгорания твердых бытовых отходов. *Промышленная энергетика*. 2001. № 9. С. 45-49.

99. Дик Э.П., Сотсков Е.В., Тугов А.Н. Расчет потерь тепла с механическим недожогом при термическом обезвреживании твердых бытовых отходов. *Электрические станции*. № 11. 2003. С. 16-17.

100. Изюмов М.А., Супранов В.М., Тугов А.Н. Особенности теплового расчета мусоросжигательных котлов на ПЭВМ с применением программы «TRAKT». *Информационные средства и технологии: сб. докл. между- нар. конф*. Москва, 2001. Т. 2. С. 98-101.

101. Самарин О.Д. Теплофизика. Энергосбережение. Энергоэффективность. Москва, 2009. С. 296.

102. Иншеков Е., Сафьянц А., Сафьянц С., Чернявский А. Внедрение системы энергетического менеджмента на базе стандарта ISO

50001:2011: путвеодителья для специалистов компаний и предприятий Київ, GIZ. 2014. С. 38.

103. Бирюков А.Б. Энергоэффективность и качество тепловой обработки материалов в печах. *Монография*. Донецк, 2012. С. 248.

104. Бирюков А.Б., Новикова Е.В., Олешкевич Т.Г., Андриенко Е.Н. , Беляева Т.Г., Хибина М.А. Диагностика нагревательных печей периодического действия на основании построения и анализа моментальных тепловых балансов. *Промышленная теплотехника*. 2014. Т. 36. №2. С. 29-35.

105. Бирюков А.Б., Алехина Н.В., Дробот С.Г. Система диагностики тепловой работы современных реакторов синтеза метанола. *Проблемы экологии*. 2011. Вып. 1(27). С. 70-73.

106. Бирюков А.Б., Кравцов В.В., Новикова Е.В., Алехина Н.В. Системы диагностики тепловой работы лабораторных, полупромышленных и промышленных реакторов синтеза углеродных наноматериалов. *Промышленная теплотехника* . 2011. Т. 33. №5. С. 20-23.

107. Магера Ю.М. Создание расчетной модели процессов сжигания твердых бытовых отходов. *Промышленная теплотехника.* 2016. Т38. №6. с 56-63.

108. Казанцев Е.И. Промышленные печи. *Справочное руководство для расчета и проектирования, 2-е издание дополненное и переработанное* М., 1975. С. 368.

109. Частухин В.И., Частухин В.В. Топливо и теория горения : *учебное пособие для вузов.* К., 1989. С. 223.

110. 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

111. Белоусов В.Н. Топливо и теория горения. *учеб. пособ. Ч.1. Топливо*. 2011. С. 84.

112. Белоусов В.Н. Топливо и теория горения. *учеб. пособ. Ч.2. Топливо*. 2011. С. 84.

113. Enkhjargal Kh., V. V. Salomatov. Mathematical modeling of the heat treatment and combustion of a coal particle. Volatile escape stage. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2011. Volume 84. Issue 3. P. 638–647.

114. Кравцов В.В., Бирюков А.Б., Дробышевская И.П. Теплотехника термической переработки твердых топлив. *учеб. пособ*. Донецк, 2011. С. 170.

115. Бирюков А.Б., Дробышевская И.П., Рубан Ю.Е. Сжигание и термическая переработка органических топлив. Твердое томливо. *учеб. пособ. для вузов.* Донецк, 2014. С. 232.

116. Магера Ю.М., Павлюк Н.Ю. Створення методики експериментального визначення теплоти згоряння твердих побутових відходів. *Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика : збірник наукових праць*. *Випуск 8*. Дніпро, 2016. С. 130-148.

117. 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.* Харків, 2017. № 31 (1253). С. 122-127.

118. 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.* Volume 18, 2017 issue 2 P. 175-187.

119. Васильев А.С., О.Ю.Лашманов. Основы программирования в среде LabVIEW, 2015. С. 82.

120. Магда Ю.С. LabVIEW: практический курс для инженеров и разработчиков . М., 2012. С. 208.

121. Трэвис Дж., Кринг Дж. Lab V IEW для всех. *4-е издание, переработанное и дополненное*. Москва, 2011. С. 904 с.

122. Жарков Ф.П., Каратаев В.В., Никифоров В.Ф., Панов В.С. Использование виртуальных инструментов LabVIEW. Москва, 2000. С. 263.

Додаток А

Технічні характеристики газового лічильника GROSS MGM-UA G4

Газовий лічильник мембранний (Гросс) GROSS MGM-UA G4 внесений до Державного реєстру України за № 2513. Компанія Gross - виробник і постачальник приладів обліку, в тому числі і комерційного, споживання води, газу, тепла, електроенергії.

Лічильники газу мембранні призначені для вимірювання, в газопроводах низького тиску, обсягу споживання природного газу в побутових умовах, комерційного обліку для комунально-побутового споживання, а також під час технологічних процесів, де сумарне максимальне споживання газу на встановленому газовому обладнанні не перевищує 6 $м^3$/год. Лічильники газу мембранні можуть успішно використовуватися як при первинній установці, так і при заміні.

Переваги та відмінні риси лічильників GROSS MGM:

- мембранні лічильники з металевим корпусом і вісьмирозрядним рахунковим механізмом;
- при виробництві лічильників застосовані мембрани фірми Helsacomp GmbH (Німеччина)
- крива похибки переважно розташовується в позитивній області;
- конструкція рахункового пристрою лічильників оснащена механізмом передачі обертання від мембрани за допомогою магнітної муфти;
- лічильники обладнані захистом від зовнішнього магнітного впливу;
- корпус лічильників виготовлений із сталі високої якості;
- внутрішні деталі лічильників виготовлені з матеріалів, що не підлягають корозії;
- лічильники можуть виготовлятися для прямого (з права на ліво) або зворотного (зліва на право) напрямки протікання газу;
- надійне антикорозійне покриття металевих частин лічильників;

- метрологічні характеристики лічильників відповідають ДСТУ 3336 і ДСТУ EN 1359.

Технічні характеристики газового лічильника GROSS MGM-UA G4:

– максимальна об'ємна витрата, Qmax м^3/год…… 6,0

– номінальна об'ємна витрата, Qn м^3/год…….. ..4,0

– мінімальна об'ємна витрата, Qmin м^3/год ……0,040

– номінальний циклічний обсяг, дм^3 ……1,2

– поріг чутливості, не більше, м^3/год ……0,003

– діаметр умовного проходу патрубків, мм …….. 20

– номінальна міжцентрова відстань між штуцерами, не більше, мм. .110

– діапазон робочої температури навколишнього середовища, °С…….. від -40 до +60

– середнє падіння тиску при q v max, не більше Па…….. 200

– максимальне падіння тиску при q v min, не більше Па…… 60

– маса лічильника, не більше кг…… 2,05

– ширина лічильника, L мм…… 205

– висота лічильника, H мм……. 230

– глибина лічильника, B мм…… ……. 165

Додаток Б

Технічні характеристики лічильника теплоти SHARKY 775

Теплолічильник / лічильник холоду SHARKY 775 призначений для вимірювання кількості теплоти в закритих системах опалення/вентиляції, об'єму та об'ємної витрати теплоносія, температури теплоносія в подавальному та зворотному трубопроводах і різниці цих температур, теплової потужності, часу напрацювання, індикації виміряних величин, а також поточного часу , дати та службової інформації.

Лічильник застосовується при обліку теплоти в системах теплопостачання, вентиляції і кондиціонування відповідно до діючих правил обліку споживання теплоти на промислових об'єктах і об'єктах комунального господарства.

Значення гідравлічних параметрів в залежності від діаметра витратоміра наведені в таблиці Б.1.

Таблиця Б.1 – Гідравлічні параметри витратомірів SHARKY 775

Характеристика		**Значення**				
Номінальний діаметр	мм	15	15 / 20	20	25	32
Номінальна витрата	$м^3/г$	0,6	1,5	2,5	3,5 / 6	6
Максимальна витрата	$м^3/г$	1,2	3	5	7 / 12	12
Мінімальна витрата	$м^3/г$	0,006	0,006	0,01	0,035 / 0,024	0,024
Поріг чутливості	$м^3/г$	0,001	0,0025	0,004	0,007	0,007
Втрата тиску при номінальній витраті	мбар	85	75	100	44 / 128	128
Монтажна довжина	мм	110	110 / 130	130	260	260

Характеристика		**Значення**				
Номінальний діаметр	мм	40	50	65	80	100
Номінальна витрата	$м^3/ч$	10	15	25	40	60

Максимальна витрата	$м^3/ч$	20	30	50	80	120
Мінімальна витрата	$м^3/ч$	0,1	0,15	0,25	0,16	1,2
Поріг чутливості	$м^3/ч$	0,02	0,04	0,05	0,08	0,12
Втрата тиску при номінальній витраті	мбар	95	80	75	80	75
Монтажна довжина	мм	300	270	300	300	360

Додаток В

Технічні характеристик хроматографа Agilent 6890 N

Призначення і область застосування

Хроматограф газовий Agilent 6890 N оснащений наступними детекторами: полум'яно-іонізаційним, електроннозахватним, детектором теплопровідності, термоіонним, полум'яно-фотометричним і мас-селективним. Призначений для кількісного хімічного аналізу органічних і неорганічних сумішей речовин. Застосовуються в хімічній, нафтохімічній, харчовій, фармацевтичній галузях промисловості, в санітарному та екологічному контролі і т.д.

Принцип дії хроматографов заснований на поділі сумішей речовин на насадочних або капілярних колонках і подальшому їх детектуванні.

- Хроматографи комплектують шістьма детекторами: по теплопровідності (ДТП),
- полум'яно-іонізаційним (ПІД),
- електронно-захватним (ЕЗД),
- термоіонним (ТІД),
- полум'яно-фотометричним (ПФД)
- і мас-селективним (МСД).

Одночасно можуть працювати два різних детектора (крім МСД).

Хроматограф забезпечений вбудованою панеллю з дисплеєм і кнопками для включення і виключення приладу, перегляду інформації, що реєструється на дисплеї. Установку і контроль режимних параметрів виконують за допомогою мініатюрного переносного контролера з дисплеєм, на якому також реєструються хроматограми в реальному часі.

Хроматографи можуть працювати з капілярними і насадочними колонками. Газоподібні і рідкі проби речовин можуть бути введені в хроматограф вручну і за допомогою прилада «Автосамплер» на 100 проб.

Хроматографи оснащені електронним контролем режимних параметрів (температура блоків, що термостатуються, тиск і витрата газів і т.д.), сигналізацією тривоги і остановка приладу в разі відхилення параметрів від заданих значень.

У програмному забезпеченні є стандартні блоки для формування методики вимірювання, є можливість створювати спеціальні методики, що включають періодичне градуювання і контроль точності вимірювань.

Хроматографи можуть працювати в автоматичному режимі не менше 24 годин. Хроматограф може працювати в комплекті з системою Agilet ChemStation (персоний комп'ютер плюс програмне забезпечення) або інтегратором.

Модель 6890N оснащена інтерфейсами LAN для роботи в мережі.

Умови експлуатації хроматографа Agilent 6890 N:

- температура навколишнього середовища, ° С ……15-20
- відносна вологість,% ……..5-95
- температура зберігання, ° С ……40 ... 65

Середньоквадратичне відхилення вихідного сигналу:

– по площам піків, %: 2; 2; 2; 3; 3 для датчиків ДТП, ПІД, ЕЗД, ТІД та ПФД відповідно%

– для датчика МСД нормується відхилення по висоті піку і складає 4%;

– по тривалості утримання, с: 0,01; 0,02; 0,07; 0,04; 0,08; 0,07 для датчиків датчиків ДТП, ПІД, ЕЗД, ТІД, МСД та ПФД відповідно.

Додаток Д

Технічні характеристики регістратора TRITON 6004TC

Модуль TRITON 6004TC - це мікропроцесорний пристрій для реєстрації та перетворення сигналів, отриманих за допомогою термопар або інших датчиків - джерел напруги. Виміряні дані відображаються на вбудованому індикаторі і можуть бути передані до комп'ютера за допомогою інтерфейсу USB. Компенсація температури "холодних"-спаїв термопар (опорний спай) виконується або автоматично зовнішнім датчиком температури, або її задає користувач.

Модуль призначений для створення автоматизованих систем вимірювання (реєстрації) температури і може працювати спільно з іншими модулями серії TRITON.

До модулю можна підключити до 16 термопар або інших джерел напруги. Користувач може записати в пам'ять модуля параметри підключених термопар для правильного розрахунку і відображення температури. Діапазон температур і похибка визначаються типом термопари і точністю апроксимуючої поліноміальної характеристики, що використовується для цієї термопари.

Модуль живиться від інтерфейсу USB. Інтерфейс USB гальванічно розв'язаний від джерел вхідного сигналу. Вбудований індикатор відображає інформацію в форматі 4 рядки по 16 символів і має підсвічування. Діапазон відображуваних значень температури вибирається оператором за допомогою двох кнопок, розташованих на бічній стінці корпусу.

Вбудована в модуль апаратна і програмна фільтрація в поєднанні з диференціальними входами і екранованим корпусом забезпечує відмінну завадозахищеність. У модулі застосований 24-розрядний сигма-дельта АЦП з підсилювачем на вході, що забезпечує високу точність вимірювання температури.

У комплект поставки включена зручна стандартна програма для роботи з модулем і драйвер (Windows 2k / XP / 7). Програма дозволяє працювати з модулем в режимі реального часу, результат вимірювання виводиться на графік і в таблицю, є можливість експортувати його в Exel, роздрукувати, зберегти на диску.

Особливості модуля TRITON 6004TC:

- багатоканальність - до 16 каналів;
- висока завадозахищеність;
- висока точність вимірювання;
- повна гальванічна розв'язка з інтерфейсом USB;
- корпус промислового стандарту IP 66;
- компенсація температури холодного спаю;
- вбудована індикація;
- вбудоване джерело живлення 220В 50Гц.

Основні технічні характеристики модуля TRITON 6004TC наведено в таблиці Д.1.

Таблиця Д.1 – Основні технічні характеристики модуля TRITON 6004TC

Основні характеристики	Значення
Кількість термопар, що підключається	16 (або 8 диференціальних)
Типи термопар, що приміняються	МК, ХА, ХК, ПП, ПР
Діапазони вихідної напруги	±19,5 мВ ±39 мВ ±1,17 В
Термін виміру по одному каналу	0,1 с
Полоса пропускання вихідних ланцюгів	0..25 Гц
Типи датчиків компенсації холодного спаю	PT100 PT1000
Інтерфейс обміну даними	USB

Швидкість обміні по інтерфейсу	до 115200 біт/с
Довжина лінії зв’язку	до 5 м
Габаритні розміри	94x160x50 мм
Маса	не більше 300г

Додаток Ж

Технічні характеристики багатофункціонального вимірювального приладу TESTO 435

Вимірювальний прилад для оцінки якості повітря в приміщеннях і навколишньому середовищу і інспекції систем опалення, вентиляції, кондиціювання.

` Прилад оснащено рядом зондів для виміру температури газового середовища, його вологості, абсолютного тиску, швидкості, вмісту CO_2.

Повний набір сенсорів включає в себе сенсор температури NTC, сенсор на базі термопари типу К, сенсор вологості, сенсор абсолютного тиску, два сенсори швидкості повітря, сенсор для виміру CO_2.

Повний діапазон виміру температури сенсором NTC становить -50..150°С. Похибка вимірювань знаходиться в діапазоні ±0,2.. ±0,5% в залежності від значення температури, що вимірюється.

При використанні в якості зонда термопари типа К діапазон вимірювання становить -200..1370 °С. Похибка вимірювань знаходиться в діапазоні ±0,2.. ±0,3% в залежності від значення температури, що вимірюється.

При вимірі вологості діапазон вимірювання становить 0..100 % ОВ.

При вимірі тиску діапазон вимірювання становить 0..200 кПа.

При вимірі швидкості за допомогою сенсора крильчатки діапазон виміру становить 0..60 м/с, а пи вимірі швидкості за допомогою сенсора струна, що обігрівається, діапазон виміру становить 0..20 м/с.

При вимірі концентрації CO2 діапазон вимірювання складає 0..10000 ppmCO_2.

Загальні характеристики багатофункціонального вимірювального приладу TESTO 435 наведено в Таблиці Ж.1.

Таблиця Ж.1 – Загальні характеристики багатофункціонального вимірювального приладу TESTO 435

Показник	Значення
Розмір	220x74x46 мм
Робоча температура	-20..50°C
Клас захисту	IP 54
Тип батареї	Щелочна AA
Вага	428 г
Ресурс батареї	200 годин (при стандартному вимірюванні крильчаткою)

Додаток З

Технічні характеристики портативного газоаналізатора MRU Optima 7

Гзоаналізатор MRU Optima 7 дозволяє проводити контрольні вимірювання складу газової фази, проводити наладку котлів, турбін і печей. Прилад характеризується малими масогабаритними параметрами, максимальною офіційної точністю вимірювання, і можливістю експлуатувати його при негативних температурах.

Вага газоаналізатора складає близько 1 кг. Він дозволяє вимірювати концентрації до 7 типів газів одночасно: електрохімічними сенсорами O_2, CO, NO, NO_2, SO_2, H_2S, і інфрачервоним сенсором CO_2. При цьому, канали CO і NO мають по два діапазони, перемикання діапазонів відбувається автоматично. Таке рішення забезпечує високу точність вимірювання.

Є можливість заміни стандартного сенсора O_2 на сенсор O_2 «longlife» розрахований на 5 років роботи. Крім цього газоаналізатором OPTIMA7 можна проводити вимірювання швидкості димових газів і розрахунок масових викидів шкідливих речовин в атмосферу.

Тривалість роботи від акумуляторів до 15 годин. Мінімальна робоча температура -30º С.

Газоаналізатор Optima7 сертифіковано в Україні та республіці Білорусь.

За сукупністю метрологічних і споживчих характеристик, а також на підставі офіційних документів, даний газоаналізатор можна використовувати для широкого кола завдань технологічного та екологічного призначення.

Додаток К

Технічні характеристики кисневого цирконієвого датчика ZFG2

Кисневі цирконієві датчики ZFG2 від компанії ABB є одними з найбільш передових у світі. Проста і надійна конструкція дає можливість легкого доступу до всіх вузлів зонда і ремонту на місці установки. Нова універсальна конструкція обумовила значну гнучкість системи, зберігши при цьому всі переваги приладів попереднього покоління.

Датчики встановлюються безпосередньо в печах або димових трубах, виключаючи необхідність застосування дорогої системи пробопідготовки. Працюючи при температурах від 20 до 600 ° С аналізатор видає точне значення концентрації кисню в димових газах без видалення вологи (так званий «мокрий аналіз»). Датчик може бути оснащений вогнепрепинювачем, що дозволяє також працювати в газових котлах. Процедура з установка і налагодження аналізатора досить проста, а технічне обслуговування вимагає мінімальних затрат

Датчик працює за наступним принципом. Вимірювальна комірка виготовлена з оксиду цирконію, який при високій температурі володіє кисневої провідністю. На поверхні цирконію розташовані пористі зовнішній і внутрішній електроди, виготовлені з платини. Повітря подається на внутрішній (порівняльний) електрод для забезпечення постійного парціального тиску кисню, в той час як вимірюваний газ надходить на зовнішній (вимірювальний) електрод. Між електродами утворюється різниця потенціалів, яка пропорційна концентрації кисню.

Цирконієві зонди ZFG2, виготовлені з нержавіючої сталі, включають в себе: керамічний фільтр, вогнеприпинювач, вимірювальну комірку, нагрівач і термопару. Перетворювач і зонд можуть з'єднуватися за допомогою спеціального кабелю довжиною 6 м в оболонці з ПВХ для ступеня захисту IP 65. Кабель також містить трубку для подачі до зонду порівняльного повітря. Зонд може мати такі розміри: 0.4 м, 1.0 м, 1.5 м і 2м.

Фіксація зонда в печі або димарі виконується за допомогою спеціального фланця. Фіксуваний зазор може використовуватися для зменшення глибини занурення зонда при установці в трубах малого діаметра. Спеціальна захисна пластина охороняє фільтр від засмічення при роботі в потоках з великим вмістом пилу. Всі компоненти зонда легко демонтуються і можуть бути замінені в робочих умовах без використання спеціальних інструментів. При заміні датчика не потрібне повторне калібрування перетворювача. На зонді передбачений вхід для каліброваного газу, з метою проведення перевірки без демонтажу самого зонда. Якщо необхідно швидке вимірювання, з датчиком поставляється спеціальний адаптер, який встановлюється замість фільтра і вогнеперепинювача.

Параметри фіксації зонда: фланець (або втулка з різьбою 21/2 дюйма для зонда 0.4 м); довжина занурення зонда 0.4 м, 1.0 м, 1.5 м, 2.0 м на замовлення до 4 м максимум; довжина спеціпльного кабелю 10 м або 6 м Максимальна відстань між зондом і перетворювачем 69 м з використанням клемників (part no. 003 000 060) і додаткового кабелю Вага зонда 0.4 м - 6 кг (включаючи 6 м кабелю); 1.0 м -10.8 кг (включаючи 6 м кабелю); 1.5 м - 11.6 кг (включаючи 6 м кабелю); 2.0 м - 12.5 кг (включаючи 6 м кабелю).

Додаток Л

Технічні характеристики газоаналізатора GM 35

Газоаналізатори GM35 призначені для автоматичного безперервного вимірювання вмісту одного або декількох наступних: оксид вуглецю (CO), діоксид вуглецю (CO_2), пари води (H_2O), закис азоту (N_2O), а також температури і тиску в газах паливоспалюючих установок і технологічних середовищах.

Газоаналізатори GM35 (далі - газоаналізатори) є стаціонарними автоматичними приладами безперервної дії. Принцип дії газоаналізатора заснований на оптоелектронному методі вимірювання безпосередньо в аналізованмуї середовищі без попереднього відбору та підготовки газової проби з використанням оптичних кореляційних фільтрів (для H_2O і CO_2) або газових фільтрів на кожен компонент (для CO і N_2O) в інфрачервоному діапазоні спектра. Молекули газу поглинають світлову енергію в певному діапазоні довжин хвиль, типовому для кожного компонента. Далі проводиться спектральне розкладання світла для виявлення смуг поглинання кожного з визначених компонентів і подальша оцінка відповідних концентрацій.

Вимірювання температури здійснюється термометром опору Pt1000.

Газоаналізатори мають два виконання:

– виконання з вимірювальним зондом (використовуються зонди типу GMP або GPP);

– виконання для установки поперек газоходу (далі - cross-duct version, CD).

Газоаналізатори випускаються в 8-ми модифікаціях, що відрізняються переліком визначених компонентів і вимірюваних величин, відмінні риси модифікацій приведені в таблиці Л.1.

Таблиця Л.1 - Характеристики модифікацій газоаналізатора GM35

Позначення модифікації газоаналізатора	Компонент, що визначається / величина, що вимірюється				
	Оксис вуглецю (CO)	Діоксид вуглецю (CO_2)	Пари води (H_2O)	Закис азоту (N_2O)	Температура і тиск
GM35-1	+	-	-	-	+
GM35-2	+	-	+	-	+
GM35-3	+	+	+	-	+
GM35-4	+	+	-	-	+
GM35-5	-	+	+	-	+
GM35-6	-	-	+	-	+
GM35-7	-	+	-	-	+
GM35-10	-	+	+	+	+

Блок приймача з зондом, блок відбивача (для виконання для установки поперек газоходу) кріпляться безпосередньо на газоході або димовій трубі за допомогою монтажних фланців. Вузол подачі продувочного повітря монтується в безпосередній близькості і з'єднується з пристроєм подачі чистого повітря за допомогою шланга. Блок обробки даних може розташовуватися на відстані до 1000 м від блоку приймача, в цьому випадку використовується сполучна коробка. Зв'язок між блоком обробки даних і блоком приймача здійснюється через CAN-bus. Газоаналізатор має вбудовану систему автоматичної діагностики і сигналізації. Блок обробки даних має зручний графічний дисплей, а також панель управління для входу в меню параметризації і діагностики та світодіодну індикацію стану.

Датчики температури і тиску вбудовані:

– для зонда GPP - безпосередньо в зонд;

– для зонда GMP - в вузол подачі продувочного повітря, встановлюється зовні зонда між установочними фланцем і фланцем кріплення блоку приймача.

Загальні технічні характеристики вимірювальних блоків газоаналізаторів наведені в таблиці Л.2.

Таблиця Л.2 – Загальні технічні характеристики вимірювальних блоків газоаналізаторів

Найменування характеристики	GM35 з вимірювальним зондом GMP	GM35 з вимірювальним зондом GPP «dry»	GM35 з вимірювальним зондом GPP «wet»	GM35 для установки поперек газоходу (CD)
Конструктивні особливості	Зонд має відкриту конструкцію для безпосереднього проходження потоку газу	Проба газу дифундує через керамічний фільтр	Проба газу дифундує через тефлоновий /керамічний фільтр	Має відкриту конструкцію для безпосереднього проходження потоку газу
Максимальна температура газу, °С	430 (для N_2O не більше 180)	430 (для N_2O не більше 180)	430 (для N_2O не більше 180)	430 (для N_2O не більше 180)
Можливість безпосередньої подачі газової суміші з балона для перевірки /повірки	Ні (тільки через Gas Filter Box)	Так	Так	Ні (тільки через Gas Filter Box)
Необхідність в періодичній очистці вповітрям	Так	Ні	Ні	Так
Нагрів оптичних поверхонь у відбивачі	Ні	Так, з вбудованим контролером	Так, з вбудованим контролером	По додатковому заказу
Швидкість газу трубі	від 1 до 40 м/с	від 0 до 40 м/с	від 0 до 40 м/с	від 0 до 40 м/с
Пригідність для вологих газів	Так	Ні	Так	Так
Максимальний надлишковий тиск	120 кПа	120 кПа	120 кПа	120 кПа

Діапазони вимірювань і межі допустимої основної похибки газоаналізаторів по газоаналітичним вимірювальним каналам (CO_2 та H_2O)

наведені в таблиці Л.3, по вимірювальним каналам температури і тиску - таблиці Л.4.

Таблиця Л.3 – Характеристики вимірювальних каналів по CO_2 та H_2O

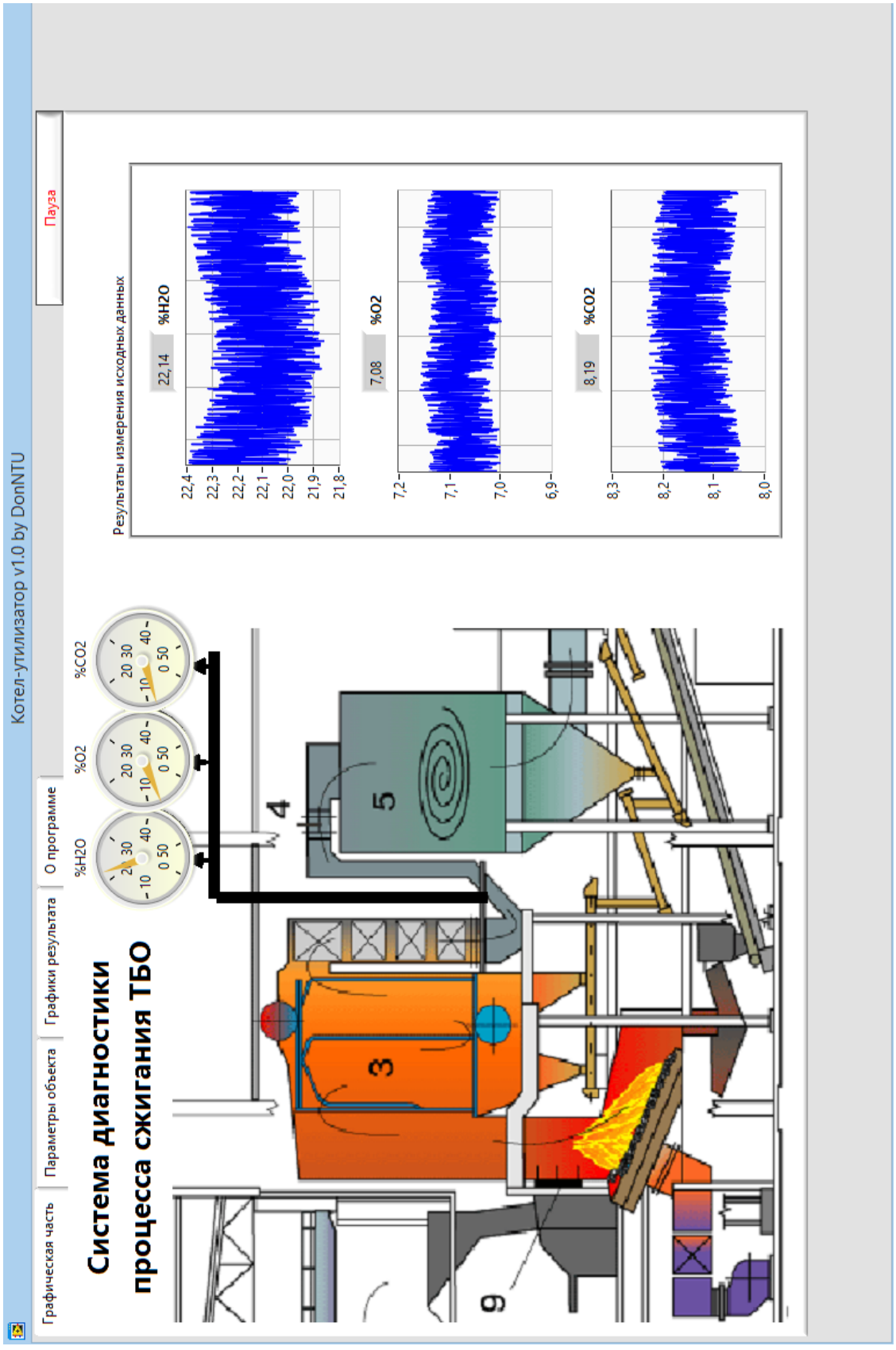
Компонент, що визначається / вимірювальний зонд	Діапазон показань об'ємної долі компонента, що визначається	Діапазон вимірювань об'ємної долі компонента, що визначається	Межі основної погрішності, що допускається	
			приведеної, %	відносної, %
Діоксид вуглецю (CO_2) ** / GPP	від 0 до 25 %	від 0 до 25 %	±3	
	відт 0 до 50 %	від 0 до 25 % включ. Св. 25 до 50 %	±3	±3
	від 0 до 100 %	від 0 до 25 % включ. Св. 25 до 100 %	±3	±3
Діоксид вуглецю (CO2) ** / GMP, CD	від 0 до 25 %	від 0 до 15 %	±3	
	від 0 до 50 %	від 0 до 15 %	±3	-
	від 0 до 100 %	від 0 до 15 %	±3	-
Пари води (H2O) / GPP	від 0 до 22,5 %	від 0 до 3 % включ. Св. 3 до 22,5 %	±10	±10
	від 0 до 100 %	від 0 до 3 % включ. Св. 3 до 22,5 %	±10	±10
Пари води (H2O) / GMP, CD	від 0 до 22,5 %	від 0 до 4 %	±10	
	від 0 до 100 %	від 0 до 4 %	±10	-

Таблиця Л.4 - Вимірювальні канали температури і тиску

Вимірювана величина	Діапазон показань	Діапазон вимірювання	Межі основної абсолютної погрішності, що допускається
Температура середи, що аналізується (PT 1000)	від 0 до 430 °C	від 0 до 430 °C	±3 °C
Абсолютний тиск середи, що аналізується	від 60 до 120 кПа	від 60 до 120 кПа	±1 кПа

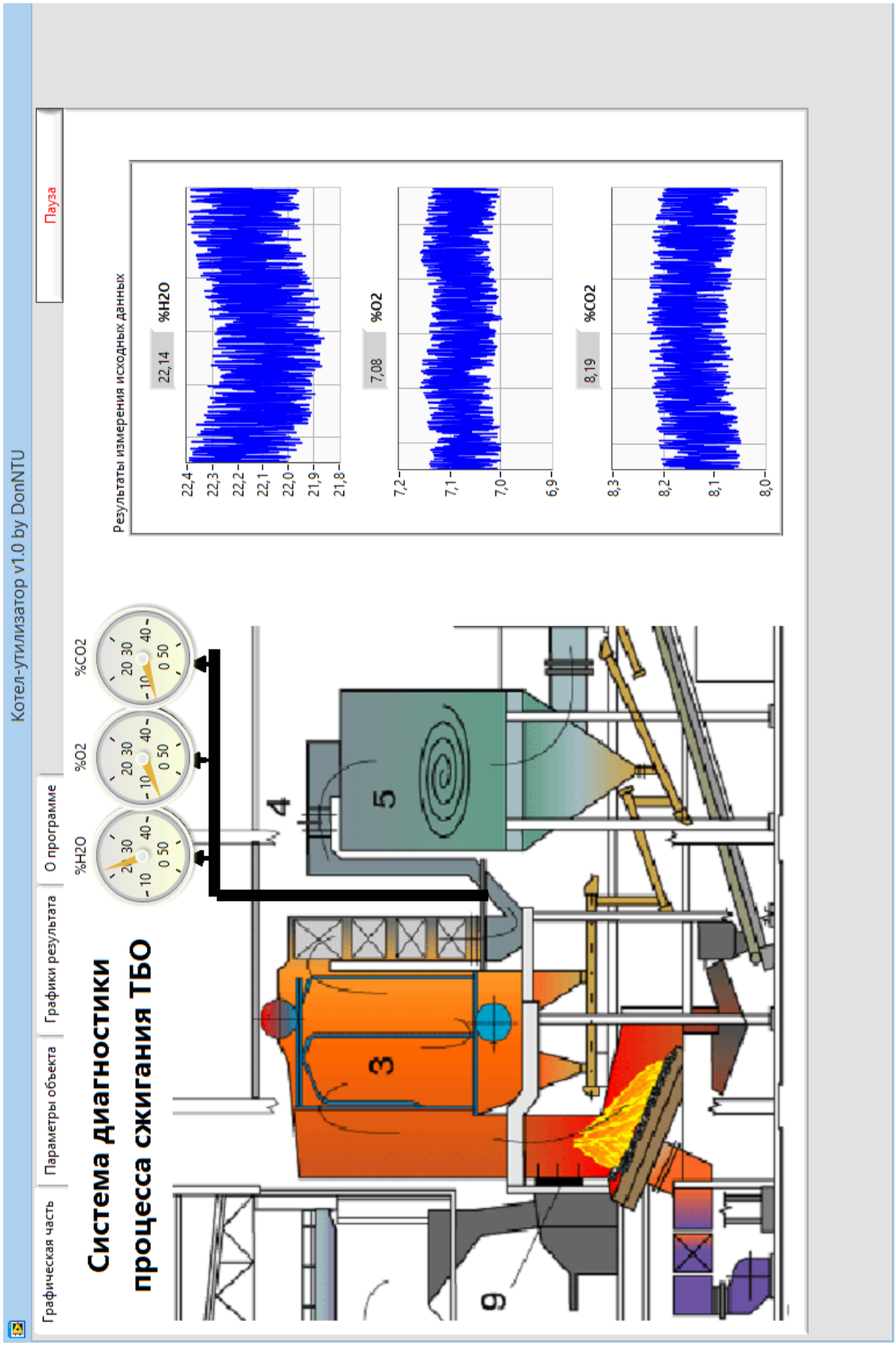
Додаток М

Вікно аналізу вхідних даних в створеному емуляторі системи діагностики



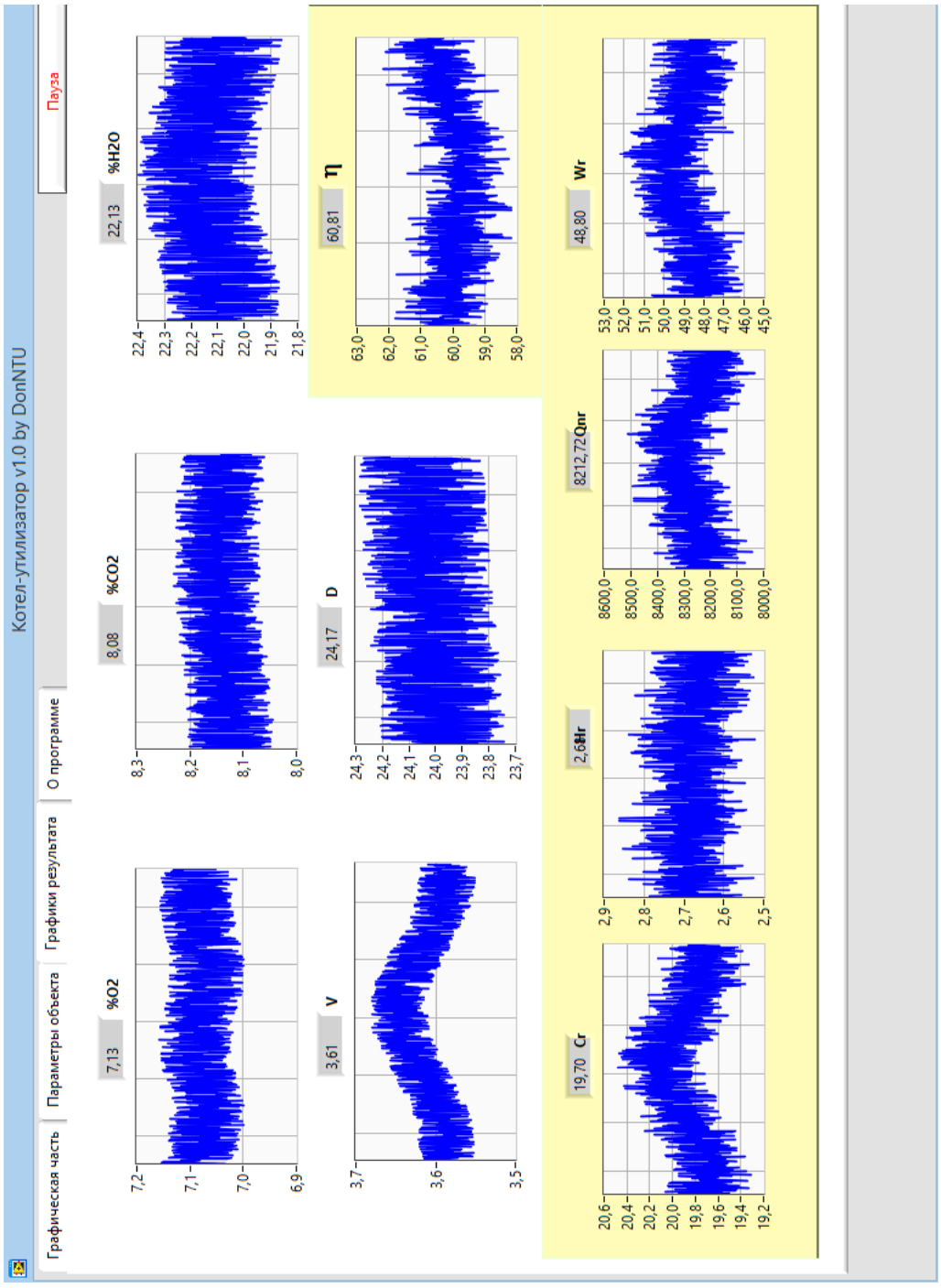
Додаток М

Вікно аналізу вхідних даних в створеному емуляторі системи діагностики



Додаток Н

Сполучене вікно аналізу вхідних даних та видачі результатів у створеному емуляторі системи діагностики



Додаток О

Акт впровадження основних положень дисертаційної роботи

Филиал "Завод "Энергия" Киевэнерго"
Публичного акционерного общества
"КИЕВЭНЕРГО "

02121 г.Киев, ул.Коллекторная,44, тел./ф. 564-59-83, 563-98-98, 205-52-51, e-mail: BolyachevetsTV@dtek.com

10.08.2017 №047/01-518
на №_____

Директору ГП «НИКТИГорХоз»

Кравченко В.А.

Уважаемый Валерий Анатолиевич!

На ваше письмо №715 от 07.08.2017 сообщаем, что в настоящее время на Заводе «Энергия» сокращен расход подсветочного газа относительно проектного решения, в том числе за счет мероприятий, предложенных в диссертационной работе «Исследование перспектив использования ТЭС на ТБО для развития национальной энергетики» ее автором Магерой Ю.М..

Так, в работе создана расчетная модель процесса сжигания ТБО, основными элементами которой являются блоки по построению материальных балансов сжигания ТБО, природного газа, совместного сжигания ТБО и природного газа и теплового баланса топки, сжигающей ТБО.

Созданная модель позволяет решать задачу определения в каждом конкретном случае необходимости сжигания дополнительного топлива для обеспечения возможности горения ТБО и заданного уровня температуры в топке котла. При необходимости сжигания дополнительного топлива отработана возможность определения его требуемого расхода. Также созданная модель позволяет исследовать влияние технологических и конструктивных параметров на условия сжигания ТБО, в частности на температурный уровень в топке. Такая методика является полезным инструментом на стадии проектирования оборудования для сжигания ТБО, при наладке и поиске рациональных технологических параметров для существенного оборудования.

С помощью данной модели получен ряд уравнений регрессии для различных режимов эксплуатации оборудования характеристиками процесса. Полученные уравнения являются полезным инструментом для определения условий работы топки, при которых есть возможность проводить процесс сжигания ТБО с минимизацией использования дополнительного топлива – природного газа.

С уважением,
Директор С.С. Крикун