

Національна академія наук України
Інститут технічної теплофізики

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Веремійчук Ганна Миколаївна

УДК 620.9

ДИСЕРТАЦІЯ

**АЕРОДИНАМІКА ТА ТЕПЛООБМІН ПРИ СПАЛЮВАННІ
АГРОПЕЛЕТ В КОТЛАХ ПОБУТОВИХ СПОЖИВАЧІВ**

144 – Теплоенергетика

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

Ганна ВЕРЕМІЙЧУК

Науковий керівник – Басок Борис Іванович, член-кореспондент НАНУ, доктор технічних наук, професор

Київ – 2023

АНОТАЦІЯ

Веремійчук Г.М. Аеродинаміка та теплообмін при спалюванні агропелет в котлах побутових споживачів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 144 – Теплоенергетика. – Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, 2023.

Дисертаційне дослідження присвячене дослідженню та вирішенню актуального наукового завдання, що полягає в розробці та вдосконаленні пальників для спалювання пелет сільськогосподарського походження, визначення основних закономірностей процесу їх горіння й дослідження впливу режимних параметрів на тепловий стан топкової камери котла малої потужності.

В роботі проведено літературно-патентний пошук за темою дисертаційного дослідження. Проведено оцінку загального стану біоенергетичної галузі та сучасні тенденції у застосуванні біопалива аграрного походження в Україні, яке має певний потенціал щодо розвитку даного напрямку за рахунок значної ресурсної бази. За результатами аналізу літературних джерел встановлено, що біомаса в основному використовується для виробництва теплоти у великих або середніх по потужності котлах систем централізованого опалення та у побутових котлах на дровах/пелетах, у печах і у камінах. Встановлено, що використання агропелет в побутових котлах стає все більш поширеним. Це зумовлено не тільки екологічними перевагами, але й високою тепловою ефективністю та зручністю у використанні. Розвиток технологій виробництва та спалювання агропелет дозволяє досягати більш високої ефективності горіння, мінімізуючи при цьому забруднення повітря шкідливими речовинами. Враховуючи ці аспекти, агропелети можуть відігравати ключову роль у переході до більш сталого та екологічного енергетичного майбутнього. Крім цього використовуючи біопаливо аграрного походження в Україні, як стратегічний ресурс для задоволення паливних

потреб населення та заміщення імпортованого природного газу і найсуворішої економії паливно-енергетичних ресурсів особливо у воєнний час.

В ході виконання дисертаційної роботи було вдосконалено та впроваджено експериментальну установку на основі твердопаливного котла типу Viadrus тепловою потужністю 30 кВт з оригінальним пелетним пальником, що дозволяє ґрунтовно досліджувати особливості спалювання різних типів агропелет та палива рослинного походження для опалення будинку у філії ІТТФ НАН України (вул. Булаховського, 2).

Зміст дисертаційного дослідження викладено у п'яти розділах, у яких представлені та обґрунтовані основні результати роботи.

У вступі обґрунтовано актуальність обраної теми дослідження, сформувані цілі та завдання дослідження, наведено дані про зв'язок роботи з науковою програмою, зазначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Наведено дані про отримані результати при виконанні дослідження, апробацію матеріалів дисертаційної роботи та список публікацій.

У першому розділі було проведено аналіз літературних джерел сучасних технологій, щодо наявного потенціалу вирощування енергетичних культур в Україні, їх застосування та енергетичний потенціал кожного виду біоенергетичних ресурсів. Визначено основні фізичні та енергетичні характеристики сировини з біомаси. З'ясовано особливості застосування агропелет в комунальному секторі, а також проаналізовані проблеми щодо використання агропелет в енергетичному секторі України. Проведено аналіз нормативно-правового забезпечення підтримки та розвитку біоенергетики. Проведено аналіз даних сучасного рівня технологій спалювання агропелет та класифікації пальників та принципу їх роботи.

У другому розділі наведено результати проведених експериментальних досліджень спалювання рослинних пелет, визначено характеристики процесу горіння пелет в топці пальника, що приєднаний до побутового котла. Визначено характерні особливості температурних режимів роботи котла при

спалюванні агропелет різного типу (солома ячменю та пшениці, гранули із качанів кукурудзи, пелети із соломи ріпаку та з бурякового жому) та пелет з деревини.

На основі побудованих графічних залежностей було визначено основні закономірності процесу їх горіння й досліджено вплив режимних параметрів на розподіл температур в топковій камері котла.

У третьому розділі було проведено моделювання згоряння деревних пелет в топковій камері котла на твердому паливі та наведено теплогідрравлічні особливості течії в «водяній сорочці» котла. Проведено розрахунок горіння пелет за допомогою скінчено-елементних CFD-моделей котла і пальника в середовищі програмного комплексу ANSYS-Fluent, здійснено прогнозування розподілу середніх швидкостей і температур агропелет в пальнику, який встановлений в експериментальній установці твердопаливного котла для опалення будинку пасивного типу.

Під час виконання дисертаційної роботи було проведено чисельне моделювання процесів тепло- і масоперенесення, що супроводжують горіння пелет рослинного походження. Послідовно розглядалися стадії висушування пелети, термічного розкладання біопалива з виходом летючих газів, згорання летючих газів в повітряному середовищі та горіння вуглецевого залишку. Визначено поля температури, швидкості повітряної течії при природній конвекції та концентрації компонентів газового середовища.

Проведено порівняння результатів чисельного моделювання з власними експериментальними даними для визначення задовільного співпадіння і підтвердження можливості використання обраної моделі для системи пальник-котел.

У четвертому розділі досліджена емісія CO та NO_x при спалюванні подрібненого палива в пальнику, що дозволило виявити режими спалювання, що прийнятні для реалізації в промисловому обладнанні різної потужності.

При спалюванні деревних пелет були здійснені вимірювання значень CO та NO_x, що дозволить в подальшому виключити екологічно небезпечні режими спалювання пелет в котлах.

У п'ятому розділі дисертаційної роботи запропоновано рекомендації щодо виготовлення пальників для спалювання біопалива аграрного походження. Наведені в розділі матеріали можуть бути використані для розробки та вдосконалення пальників котлів малої потужності для спалювання пелет аграрного походження та зменшення витрати на опалення і підвищення ефективності використання енергоресурсів.

Отримані результати найдоцільніше застосовувати для потреб теплозабезпечення в промисловості, комунальній сфері та в індивідуально-побутовому секторі.

У загальних висновках авторкою представлені наукові та практичні результати дисертаційного дослідження. Наведені в дисертаційній роботі матеріали можуть бути використані для розроблення та вдосконалення пристроїв для спалювання пелет сільськогосподарського походження, а також для вибору найбільш оптимальних режимів спалювання даних пелет в котлах малої потужності.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- розроблено чисельну модель, що дозволяє детально аналізувати теплофізичні процеси в побутовому пелетному пальнику малої потужності при спалюванні пелет із рослинної сировини. Це відкриває можливості для точного прогнозування та оптимізації роботи пальників;

- знайдено залежність енергетичних характеристик пальника, таких як теплова потужність, температура газоподібних продуктів згорання, що виводяться з камери згорання, від його геометричних розмірів, зокрема від його довжини при сталій ширині. Розроблені алгоритми чисельного дослідження та його результати можуть використовуватися при проектуванні побутових пелетних пальників малої потужності;

- визначено характеристики температурних режимів котла малої потужності із пальником, які дозволять спалювати широкий асортимент пелет сільськогосподарського походження;

- визначено концентрації NO_x , O_2 та CO у димових газах при спалюванні агропелет та отримано оптимальне співвідношення даних компонент, які відповідають діючим нормативам.

Практичне значення одержаних результатів:

- стійке теплозабезпечення індивідуально-побутового сектору та малого бізнесу в сучасних умовах воєнного стану для уникнення блек-теплогутів;

- використання для модульних містечок для переселенців та для шелтерів;

- завдяки моніторингу отримано оперативне, оптимальне та раціональне використання пелетного біопалива місцевого походження;

- мінімізація склування та спікання золи розумним керуванням процесу спалювання.

Ключові слова: *біоенергетика, пелетний пальник, біопаливо, агропелети, гранулювання, котел, процеси горіння, спалювання, теплообмін, аерогідродинаміка, рівняння динаміки потоку та перенесення енергії, тепловтрати, випромінювання, опір теплопередачі, чисельне моделювання, k- ϵ модель турбулентності.*

ANNOTATION

Veremiichuk H.M. Aerodynamics and heat exchange during combustion of agricultural pellets in boilers for domestic consumers. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 144 – Thermal power engineering. – Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, Kyiv, 2023.

The dissertation research is devoted to the research and solution of the actual scientific problem, which consists of the development and improvement of burners for burning pellets of agricultural origin, the determination of the main laws of the process of their combustion, and the study of the influence of regime parameters on the thermal state of the furnace chamber of a low-power boiler.

The work conducted a literary and patent search on the topic of dissertation research. An assessment of the general state of the bioenergy industry and current trends in the use of biofuels of agricultural origin in Ukraine, which has a certain potential for the development of this direction due to a significant resource base, has been carried out. According to the results of the analysis of literary sources, it was found that biomass is mainly used to produce heat in large or medium-sized boilers of centralized heating systems and domestic boilers with firewood/pellets, in furnaces, and fireplaces. It is established that the use of agro-plants in domestic boilers is becoming more common. This is due not only to environmental benefits but also to high thermal efficiency and ease of use. The development of technologies for the production and burning of agro-plants allows for achieving higher combustion efficiency while minimizing air pollution by harmful substances. Given these aspects, agri-plants can play a key role in the transition to a more sustainable and sustainable energy future. In addition, biofuels of agricultural origin in Ukraine as a strategic resource to meet the fuel needs of the population and replace imported natural gas and the strictest economy of fuel and energy resources, especially in wartime.

In the course of the dissertation, an experimental installation was improved and implemented based on a solid fuel boiler of the VIADRUS type with a thermal capacity of 30 kW with an original pellet burner, which allows us to thoroughly study the features of burning various types of agri-plants and fuel of plant origin for heating a house in a branch of the Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine (Bulakhovsky St., 2).

The content of the dissertation research is presented in five sections, in which the main results of the work are presented and substantiated.

In the introduction, the relevance of the chosen research topic is substantiated, the goals and objectives of the research are formed, data on the connection of work with the scientific program are given, and the scientific novelty and practical significance of the results obtained are indicated. Data on the results obtained during the studies, testing of the materials of the dissertation work, and a list of publications are provided.

In the first section, an analysis of literary sources of modern technologies was carried out regarding the existing potential of growing energy crops in Ukraine, their application, and the energy potential of each type of bioenergy resource. The basic physical and energy characteristics of raw materials from biomass are determined. The features of the use of agro-plants in the communal sector have been clarified, as well as problems regarding the use of agro-plants in the energy sector of Ukraine have been analyzed. An analysis of the legal support for the support and development of bioenergy has been carried out. The analysis of data of the modern level of technologies of burning agri-plants and classification of burners and the principle of their work is carried out.

In the second section, the results of experimental studies of burning plant pellets are presented, and the characteristics of the process of burning pellets in the burner furnace connected to the domestic boiler are determined. The characteristic features of the temperature conditions of the boiler operation when burning agro-plants of various types (barley and wheat straw, pellets from corn cobs, pellets from rapeseed straw and beet pulp) and pellets from wood are determined.

Based on constructed graphic dependencies the basic regularities of the process of their burning have been defined and the influence of mode parameters on the distribution of temperatures in the furnace chamber of the boiler has been investigated.

In the third section, the combustion of wood pellets in the combustion chamber of the solid fuel boiler was simulated and the thermohydraulic features of the flow in the "water jacket" of the boiler were given. Pellet burning was calculated using finite-element CFD models of the boiler and burner in the environment of the ANSYS-Fluent software complex, the distribution of average speeds and temperatures of agri-elements in the burner, which is installed in the experimental installation of a solid fuel boiler for heating a passive-type house, was predicted.

During the dissertation, numerical modeling of the processes of heat and mass transfer was carried out, accompanying the burning of plant pellets. The stages of drying the pellet, thermal decomposition of biofuels with the release of volatile gases, combustion of volatile gases in the air, and combustion of the carbon residue were successively considered. The fields of temperature, airflow velocity at natural convection, and concentration of gas medium components are determined.

The results of numerical modeling were compared with their experimental data to determine a satisfactory match and confirm the possibility of using the selected model for the burner-boiler system.

In the fourth section, the emission of CO and NO_x was investigated when burning crushed fuel in a burner, which made it possible to identify combustion modes that are acceptable for implementation in industrial equipment of various capacities.

When burning wood pellets, measurements of CO and NO_x values were made, which will further eliminate environmentally hazardous modes of burning pellets in boilers.

In the fifth section of the dissertation, recommendations for the manufacture of burners for burning biofuels of agricultural origin are proposed. The materials given in the section can be used to develop and improve the burners of low-power

boilers for burning pellets of agrarian origin reducing heating costs and increasing the efficiency of energy use.

The obtained results are most expedient to apply for the needs of heat supply in industry, the communal sphere, and the individual household sector.

In the general conclusions, the author presents the scientific and practical results of the dissertation research. The materials given in the dissertation can be used to develop and improve devices for burning pellets of agricultural origin, as well as to select the most optimal modes for burning these pellets in low-power boilers.

The scientific novelty of the results obtained is as follows:

- a numerical model has been developed that allows analyzing in detail the thermophysical processes in a low-power household pellet burner when burning pellets from plant raw materials. This opens up opportunities for accurate prediction and optimization of burner operation;
- dependence of energy characteristics of the burner, such as thermal power, and temperature of gaseous combustion products discharged from the combustion chamber on its geometric dimensions, in particular on its length with a constant width, is found. The developed algorithms of numerical research and its results can be used in the design of low-power household pellet burners;
- the characteristics of the temperature conditions of a low-power boiler with a burner are determined, which will allow the burning of a wide range of pellets of agricultural origin;
- concentrations of NO_x, O₂, and CO in flue gases in the combustion of agri-plants were determined and the optimal ratio of these components that meet the current standards was obtained.

The practical significance of the results obtained:

- sustainable heat supply for the individual household sector and small businesses in modern conditions of martial law to avoid black-heat-outs;
- use for modular towns for IDPs and shelters;

- thanks to monitoring, operational, optimal, and rational use of local pellet biofuels was obtained;
- minimizing glazing and sintering of ash by reasonable control of the combustion process.

Keywords: *bioenergy, pellet burner, biofuel, agricultural pellets, granulation, boiler, combustion processes, burning, heat exchange, aero hydrodynamics, equations of flow dynamics, equations of energy transfer, reduced heat loss, radiation, heat transfer resistance, numerical modeling, k-epsilon turbulence model*

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧКИ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Басок Б. І., Давиденко Б. В., Кужель Л. М., Лисенко О. М., Веремійчук Г. М. (2021). Експериментальні дослідження спалювання рослинних пелет у побутовому котлі. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. Вип. 37. 13-23. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2021.37.13-23> [Категорія Б] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
2. Басок Б. І., Гончарук С. М., Приємченко В. П., Лисенко О. М., Веремійчук Г.М. (2021). Дослідження теплотехнічних характеристик роботи побутового котла з механічним пелетним пальником. *Екологічна безпека та природокористування*. № 40(4). 60-72. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.4.60-72> [Категорія Б] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
3. Лисенко О. М., Веремійчук Г. М., Сірий О. А. (2022) Дослідження спалювання пелет сільськогосподарського походження у котлах потужністю до 25 кВт. *Теплофізика та Теплоенергетика*. Т. 44. №3. 99-108. <https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2022.6> [Категорія Б] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
4. Баранюк О. В., Сірий О. А., Веремійчук Г. М., Лисенко О. М. (2022) Моделювання горіння пелет у котлах потужністю до 25 кВт. *Теплофізика та Теплоенергетика*. Т. 44. №4. 89-98. <https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2022.11> [Категорія Б] (Внесок здобувача: проведення чисельного моделювання, обробка та аналіз отриманих даних).
5. Басок Б.І., Давиденко Б.В., Павленко А.М., Кужель Л.М., Новіков В.Г., Гончарук С.М., Ільєнко Б.К., Нікітін Є.Є., Веремійчук Г.М. (2023) Зменшення тепловитрат через віконні конструкції. *Енерготехнології та*

ресурсозбереження Том 76 № 3. 43-57 [DOI:10.33070/etars.3.2023.04](https://doi.org/10.33070/etars.3.2023.04) [Scopus] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

6. A. Veremiichuk. Experimental studies of burning pellets in a burner up to 30 KW. Journal of new technologies in environmental science. № 1. Vol. 7. 2023. P. 3-10. [Doi: 10.53412/jntes-2023-1-1](https://doi.org/10.53412/jntes-2023-1-1) [Міжнародне видання] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Басок Б. І., Гончарук С. М., Веремійчук Г. М. (25-26 листопада, 2020) Експериментальне дослідження теплотехнічних характеристик роботи побутового котла з пелетним пальником. Тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Ресурси. Енергія. Багатофункціональні еко- та енергоефективні, ресурсозберігаючі технології в архітектурі, будівництві та суміжних галузях». Київ. 39-40. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

8. Лисенко О. М., Басок Б. І., Андрейчук С. В., Веремійчук Г. М. (9-11 березня, 2021) Забезпечення комфортних умов для споживачів при недотриманні температурного графіка подачі теплоти. *Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку*: збірник наукових праць VII Міжнародної науково-технічної та навчально-методичної конференції. Київ, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». 28. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

9. B. Basok, H. Veremiichuk (6-8 February 2020) Assessment of volume of agro-pellets in heat power industry of Ukraine. *Book of abstract IV International Scientific-Technical conference "Actual problems of renewable power engineering, construction and environmental engineering"*. Kielce, Poland, 43-45. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

10. В. Basok, A. Veremiichuk, O. Baranyuk, O. Siruy (2021) Simulation of biopellet combustion process in low power boilers. «*Actual problems of renewable energy, construction and environmental engineering*», Department of Construction Networks and Systems, Koszalin University of Technology. Kielce, Poland, 141. (Внесок здобувача: проведення чисельного моделювання, обробка та аналіз отриманих даних).

11. Basok B., Lysenko O., Veremiichuk H., Siryi O. (24-27 November 2022) Combustion of plant pellets in a household boiler. «*Actual problems of renewable energy, construction and environmental engineering*»: book of abstracts VI International Scientific-Technical Conference. Kielce, Poland, 79-81. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

12. Veremiichuk H. (24-27 November 2022) Experimental studies of burning pellets in a burner up to 30 kw. «*Actual problems of renewable energy, construction and environmental engineering*»: book of abstracts VI International Scientific-Technical Conference. Kielce, Poland, 125-128. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

13. Басок Б.І., Веремійчук Г.М. (7-8 листопада, 2023) Аеродинаміка та теплообмін при спалюванні агропелет в котлах побутових споживачів. XIII Міжнародна онлайн конференція «Проблеми теплофізики та теплоенергетики». Київ. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	18
ВСТУП.....	19
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ОБЛАДНАННЯ ПРИ СПАЛЮВАННІ БІОПАЛИВА.....	25
1.1. Аналіз розвитку біоенергетичної галузі.....	25
1.1.1. Енергетичний потенціал біомаси в Україні та світі.....	27
1.1.2. Нормативно-правове забезпечення підтримки та розвитку біоенергетики.....	35
1.2. Огляд сучасного рівня технологій спалювання агропелет.....	39
1.2.1. Котли для спалювання агропелет.....	46
1.2.2. Класифікація пальників та принцип їх роботи.....	48
1.3. Висновки до першого розділу та завдання дослідження.....	59
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	61
2.1. Експериментальні дослідження спалювання рослинних пелет.....	61
2.1.1. Експериментальні дослідження по визначенню теплофізичних характеристик процесу спалювання пелетного палива в насипному шарі.....	61
2.1.2. Температурний режим в котлі з пелетним пальником при спалюванні пелет з соломи	66
2.2. Розроблення експериментальної установки малої потужності для спалювання рослинних пелет	77
2.2.1. Опис експериментальної установки для спалювання агропелет.....	77
2.2.2. Електронний блок управління твердопаливним котлом.....	81
2.2.3. Система вимірювання температурного режиму котла з пелетним пальником.....	86
2.3. Дослідження процесу горіння пелет різного походження.....	87
2.4. Висновки до другого розділу.....	102

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ СПАЛЮВАННЯ АГРОПЕЛЕТ.....	104
3.1. Методи математичного моделювання процесів спалювання агропелет.....	104
3.2. Модель тепломасоперенесення в пальнику при горінні рослинних пелет.....	106
3.3. Дослідження тепломасообмінну при горінні агропелет.....	117
3.4. Моделювання горіння пелет у побутових котлах малої потужності в середовищі програмного комплексу ANSYS-Fluent.....	123
3.4.1. Методика CFD-моделювання.....	123
3.4.2. Теплогідравлічні особливості течії в «водяній сорочці» CFD-моделі котла.....	127
3.5. Висновки до третього розділу.....	137
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕМІСІЇ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН ТА ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОТИ ЗГОРЯННЯ, ЗОЛЬНОСТІ ТА ВОЛОГОСТІ ПЕЛЕТ.....	138
4.1 Результати випробувань по визначенню теплоти згоряння, зольності та вологості агропелет.....	138
4.1.1 Методики вимірювань.....	139
4.1.2. Прилади та апаратура.....	142
4.1.3 Результати вимірювань.....	148
4.1.4 Розрахунок вищої та нижчої теплоти згоряння.....	150
4.2 Аналіз хімічного складу димових газів в котлі при роботі пелетного пальника.....	153
4.3 Дослідження емісії забруднюючих речовин при спалюванні пелет.....	155
4.4. Висновки до четвертого розділу.....	159
РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ВИГОТОВЛЕННЯ ПАЛЬНИКІВ ДЛЯ СПАЛЮВАННЯ АГРОПЕЛЕТ В КОТЛАХ ПОБУТОВИХ СПОЖИВАЧІВ.....	160

5.1	Рекомендації вдосконалення конструкційних характеристик пелетного пальника.....	160
5.1.1	Вдосконалення методу подачі палива з бункера.....	161
5.1.2	Вимушена регульована подача повітря в камеру згоряння.....	162
5.1.3	Запобігання утворенню конгломератів з розм'якшеної золи та недогорілих гранул.....	162
5.1.4	Регулювання процесу видалення золи з камери згоряння.....	164
5.1.5	Підвищення температури в камері згоряння.....	164
5.2	Рекомендації щодо подальшого збільшення використання пелет різного типу в котлах малої потужності.....	165
5.3.	Висновки до п'ятого розділу.....	169
	ВИСНОВКИ.....	170
	СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	172
	ДОДАТОК А.....	180

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

Скорочення:

ЦО – центральне опалення;
 ГВП – гаряче водопостачання;
 ХА – хромель-алюмель;
 АПК – агропромисловий комплекс.

Умовні позначення:

x, y, z – прямокутні координати, м;
 t – значення температури, °С;
 τ – час, с;
 p – тиск, Па;
 ρ , кг/м^3 – густина;
 μ , μ_t – молекулярний і турбулентний динамічні коефіцієнти в'язкості, Па·с;
 k – енергія турбулентності, $\text{м}^2/\text{с}^2$;
 ε – дисипація енергії турбулентності, $\text{м}^2/\text{с}^3$;
 T – значення температури, К;
 V_p – об'єм пелети, м^3 ;
 F_p – площа поверхні пелети м^2 ;
 r_v – інтенсивність виходу летючих газів, $\text{кг}/(\text{м}^3\text{с})$;
 Z , % – зольність;
 NO_x – значення емісії забруднюючої речовини, ppm;
 CO – значення емісії забруднюючої речовини, ppm.

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Актуальність дисертації обумовлена екологічним станом довкілля та необхідністю залучення в енергетику альтернативних та відновлювальних джерел енергії через зростання цін на основні традиційні енергоносії та їх вичерпність.

Згідно з Міжнародним енергетичним агентством (IEA) [1], сучасне використання біоенергії, як альтернативного виду палива буде зростати більш ніж удвічі до 2050 року. Розвиток біоенергетики в світі та використання агропелет є ключовими аспектами у переході до стійких джерел енергії. Згідно зі звітом Global Bioenergy Statistics, біоенергетика покриває широкий спектр використання біомаси для виробництва енергії, включаючи рідкі біопалива, біогаз, пелети, лісове господарство, сільське господарство, відходи тощо [2].

Згідно річного балансу біоресурсів України обсяги можливого енергетичного використання товарних відходів агросировини сягають більше 10...12 млн т н.е., що складає 13..14 % загального постачання первинного енергоресурсу країни. Успішна технічна реалізація процесу енергоперетворення, наприклад, спалювання агропелет пов'язана з вибором раціональних технічних рішень та режимних параметрів роботи відповідного обладнання. Тому вдосконалення технологій та устаткування для спалювання біопалива аграрного походження є актуальною задачею, що обумовлена екологічним станом довкілля та необхідністю залучення в енергетику альтернативних і відновлювальних джерел енергії та місцевих палив у зв'язку з вичерпністю та постійним зростанням цін на викопні енергоносії.

Значну частину паливних потреб Україна задовольняє за рахунок імпортованого природного газу. Частину його можна замінити, використовуючи біопаливо аграрного походження, що виступає як стратегічний ресурс України. Це особливо важливо в умовах економічної кризи, необхідності імпортозаміщення і найсуворішої економії паливно-енергетичних ресурсів.

В сьогоденні складних умовах воєнного стану виникає необхідність у інтенсивному впровадженні інноваційних технологій для виробництва теплоти. Оскільки у деяких місцевостях мешканці не мають необхідного теплозабезпечення, а ракетні атаки постійно руйнують або пошкоджують підприємства комунального теплопостачання (котельні, теплоелектроцентралі), то потрібно впроваджувати розосереджену теплову генерацію, а саме біоенергетику. Тому котли малої потужності, теплогенератори, печі, пальники вкрай необхідно розробляти та активно впроваджувати. Пріоритетним напрямом залишається альтернативна енергетика, яка базується на використанні місцевих видів палива, найбільш доступним і перспективним з яких залишається біопаливо.

Відходи від сільськогосподарського виробництва є природним висококалорійним джерелом енергії. Рослинні пелети по елементарному складу і теплоті згоряння не дуже відрізняється від деревини, хоча їх теплота згоряння нижче, ніж аналогічний параметр сухої деревини.

Крім цього спалювання біомаси вимагає спеціальної конструкції котлів. Основні вимоги до котлів і котелень на біопаливі стосуються теплової потужності котла; необхідності комплектації котельні надійним обладнанням для накопичення і подачі біомаси різної вологості, системою пожежогасіння і підготовки палива до спалювання; забезпеченості високоефективними системами очищення газових викидів із котлів від золи і дисперсних частинок; можливості періодичного (бажано автоматизованого) очищення поверхонь нагрівання котлів від золи; забезпечення повноти згорання палива. Отже, вдосконалення існуючих та розробка інноваційних пальників для спалювання пелет сільськогосподарського походження в котлах є актуальною задачею та є одним із шляхів забезпечення енергетичної безпеки України.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана згідно плану НДР Інституту технічної теплофізики НАН України у відділі теплофізичних основ енергоощадних технологій за науковою тематикою: «Розробка експериментальних зразків

устаткування та технологій спалювання пелет сільськогосподарського походження (агророслинних та деревних пелет) тепловою потужністю до 30 кВт» (№ держреєстрації 0120U101584) за 2-м етапом «Вдосконалення існуючих та розробка інноваційних пальників для спалювання пелет сільськогосподарського походження» та за 3-м етапом «Розробка та вибір оптимальних технологічних режимів спалювання пелет різного типу».

Мета та завдання дослідження. Мета дослідження – розробка та вдосконалення пальників для спалювання пелет сільськогосподарського походження, визначення основних закономірностей процесу їх горіння й дослідження впливу режимних параметрів на тепловий стан топкової камери котла малої потужності. Дослідження аеродинамічних та тепломасообмінних процесів при спалюванні різних видів рослинних пелет в пальниках котлів малої потужності.

Для досягнення мети були поставлені та вирішені наступні задачі дослідження:

- моделювання горіння пелет у побутових котлах малої потужності з використанням програмного комплексу ANSYS-Fluent;
- експериментальні дослідження процесів теплообміну та горіння в спарці пальник – котел при використанні різних агропелет;
- проведення порівняння результатів чисельного моделювання з експериментальними даними для визначення співпадіння та підтвердження придатності розрахункових моделей;
- розробка рекомендацій для підвищення ефективності горіння та модернізації пальників і котлів малої потужності для різних сфер використання агропалива, включаючи комунальну теплоенергетику, промисловість, соціально-бюджетні установи та індивідуальний сектор.

Об'єкт дослідження – тепломасообмін та аеродинаміка при горінні агропелет в пальниках.

Предмет дослідження – інноваційний інтелектуальний пальник потужністю до 30 кВт для спалювання складних видів палива і його взаємодія із топковим простором котла

Методи дослідження – експериментальні дослідження та чисельне моделювання процесів тепло- і масоперенесення, що супроводжують горіння пелет, аналіз отриманих результатів.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються:

Достовірність отриманих наукових положень та висновків сформульованих в дисертації обґрунтовано методами та збігом теоретичних і експериментальних результатів досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів:

– розроблено чисельну модель, що дозволяє детально аналізувати теплофізичні процеси в побутовому пелетному пальнику малої потужності при спалюванні пелет із рослинної сировини. Це відкриває можливості для точного прогнозування та оптимізації роботи пальників;

– знайдено залежність енергетичних характеристик пальника, таких як теплова потужність, температура газоподібних продуктів згорання, що виводяться з камери згорання, від його геометричних розмірів, зокрема від його довжини при сталій ширині. Розроблені алгоритми чисельного дослідження та його результати можуть використовуватися при проектуванні побутових пелетних пальників малої потужності;

– визначено характеристики температурних режимів котла малої потужності із пальником, які дозволяють спалювати широкий асортимент пелет сільськогосподарського походження;

– визначено концентрації NO_x , O_2 та CO у димових газах при спалюванні агропелет та отримано оптимальне співвідношення даних компонент, які відповідають діючим нормативам.

Практичне значення одержаних результатів:

- стійке теплозабезпечення індивідуально-побутового сектору та малого бізнесу в сучасних умовах воєнного стану для уникнення блек-теплогутів;
- використання для модульних містечок для переселенців та для шелтерів;
- завдяки моніторингу отримано оперативне, оптимальне та раціональне використання пелетного біопалива місцевого походження;
- мінімізація склування та спікання золи розумним керуванням процесу спалювання.

Особистий внесок здобувача. Здобувачем виконано аналіз літератури, основний обсяг експериментальної роботи, обробку та аналіз отриманих даних. Участь у постановці загальної задачі досліджень, трактування та узагальнення експериментальних результатів. Підготовка доповідей та статей.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи обговорювались та отримали схвалення на міжнародній науково-практичній конференції «Екологія. Ресурси. Енергія. Багатофункціональні еко- та енергоефективні, ресурсозберігаючі технології в архітектурі, будівництві та суміжних галузях» (Київ, 2020), VII Міжнародній науково-технічній та навчально-методичній конференції (Київ, 2021), IV International Scientific-Technical conference “Actual problems of renewable power engineering, construction and environmental engineering” (Kielce, 2020), V International Scientific-Technical conference «Actual problems of renewable energy, construction and environmental engineering» (Kielce, 2021), VI International Scientific-Technical Conference (Kielce, 2022), XIII Міжнародна онлайн конференція «Проблеми теплофізики та теплоенергетики» (Київ, 2023).

Публікації. Основні положення та наукові результати викладено у 13 публікаціях наукових робіт, у тому числі: 5 статей у наукових спеціалізованих виданнях України, перелік яких затверджено МОН України; 1 стаття у

наукових виданнях за кордоном; опубліковано 7 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

Структура дисертації. Дисертаційна робота викладена на 182 сторінках, складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаної літератури та додатку. Обсяг основного тексту дисертаційної роботи становить 179 сторінка, включно 69 рисунків, 15 таблиці та 1 додаток. Список використаних джерел містить 76 найменувань.

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ОБЛАДНАННЯ ПРИ СПАЛЮВАННІ БІОПАЛИВА

1.1. Аналіз розвитку біоенергетичної галузі

Країни світу розглядають і спрямовують державну політику на економічне використання біомаси для задоволення своїх енергетичних потреб. За оцінками Міжнародного енергетичного агентства (IEA) на період до 2050 року, світове споживання енергії невпинно зростатиме [1]. У цьому контексті Кіотський протокол [3], директиви ЄС [4, 5], міжнародні та національні угоди [6], а також рішучі політичні рішення сприяють інтенсифікації використання відновлюваних джерел енергії [7].

Біомаса є відновлюваним альтернативним джерелом, яке зустрічається в усьому світі. Ресурси біомаси охоплюють сільськогосподарські культури, рослинні рештки, лісові ресурси, а також спеціальні енергетичні рослини. Біомасу отримують як відходи в процесі всього технологічного процесу сільськогосподарського виробництва. Багато залишків отримують від орних польових культур та сільськогосподарських культур. Енергетична політика і планування розвитку, що забезпечує продовольчу безпеку у світі, повинні підтримуватися на місцевому, національному та регіональному рівнях з точки зору використання біомаси в енергетичних цілях.

Сільське господарство відкритого ґрунту, що включає вирощування зернових культур, картоплі, цукрового буряку, олійних культур, овочів, садів, виноградників і оливок, є найбільшою сільськогосподарською галуззю в європейських країнах за площею земельних угідь та обсягом виробництва [8].

Історично склалося, що використання енергії в глобальному та європейському сільському господарстві домінує енергія, вироблена з викопного палива [9–14]. Слід зазначити, що існує чітка позитивна залежність між використанням енергії та викидами парникових газів, однією з основних причин якої є залежність від викопних видів палива [9]. Це свідчить про те, що скорочення використання викопних джерел енергії також зменшить викиди

парникових газів. До того ж, залежність сільськогосподарського сектору від викопних видів палива накладає на навколишнє середовище цілий ряд додаткових проблем, включаючи втрату біорізноманіття, виснаження ґрунтів та забруднення природних екосистем [15, 166].

Із запуском Зеленого курсу ЄС прагне стати кліматично нейтральним до 2050 року, а стратегія ЄС передбачає сталий сільськогосподарський сектор, що вимагає значного відходу від викопного палива. Біомаса, включаючи промислові та побутові відходи, буде відігравати важливу роль у досягненні цільового показника ЄС у 32% [17] відновлюваних джерел у загальному споживанні енергії до джерел у загальному енергоспоживанні до 2030 року. За даними [18] біомаса, у поєднанні з сонячною тепловою та геотермальною енергією, має найбільший потенціал у досягненні енергетичних цілей ЄС до 2050 року (повне покриття енергетичних потреб в опаленні та охолодженні, скорочення викидів парникових газів на 80 парникових викидів на 80-95%).

Отже, біоенергетика є основним джерелом відновлюваної енергії, що забезпечує 86% відновлюваного опалення та охолодження у країнах ЄС (58,6 % всього споживання відновлювальної енергії) [19].

Використання джерел відновлюваної енергії (ВДЕ) в Україні з року в рік набирає популярності. Передусім це пов'язано із суттєвим зростанням ціни на газ. Проте, на тлі зростаючого попиту на використання сонячної та вітрової енергії, ми можемо спостерігати відставання у розвитку такого перспективного для країни виробництва, як виробництво тепло- та електроенергії з біомаси. Зважаючи на показники попередніх років, є чітке бачення потреби у використанні ВДЕ на території України і ці показники щороку зростають. Насамперед, цьому сприяє підвищення цін на енергоносії.

Згідно експертних оцінок офіційних статистичних даних за 2007 р. теоретичний потенціал біопалива в Україні ще тоді становив 50 млн. т.у.п. в рік, технічний – 30,23 млн. т.у.п., а економічно доцільний – 27,27 млн. т.у.п. [20]. Тобто, виходячи з теперішнього рівня загального споживання первинних

енергоносіїв в Україні, економічний потенціал біомаси може задовольнити близько 11% загальної потреби України в енергії вже до 2035 року[21].

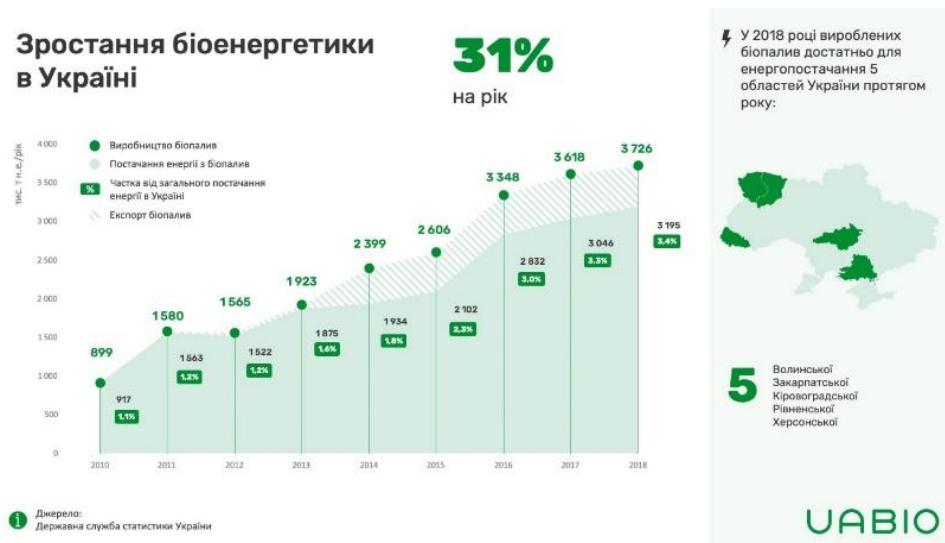


Рис. 1.1 Зростання біоенергетики в Україні

1.1.1 Енергетичний потенціал біомаси в Україні та світі

В Україні енергетичний потенціал біомаси тільки з АПК становить еквівалент 17-20 млрд. кубометрів природного газу. Як аграрна країна, Україна повинна зосередити свою увагу саме на використанні відходів і побічних продуктів сільського господарства, адже тут є величезний ресурс. Передбачається, що до 2035 року максимум 30% всього сектору покриє дерев'яна біомаса, а інші 70% потрібно шукати саме в агросекторі.

Загальне споживання біопалива в Україні у 2050 році може становити 23,1 млн т н.е./рік. Близько 50% цих ресурсів використовуватимуться для виробництва теплової енергії і замінюватимуть природний газ (еквівалентно заміщенню 13,7 млрд м³/рік природного газу). Інша частина замінюватиме вугілля і атомну генерацію для виробництва електроенергії, а також нафтопродукти на транспорті.

Значний обсяг паливних потреб Україна задовольняє за рахунок імпортованого природного газу. Частина його можна замінити, використовуючи біопаливо аграрного походження, що являє стратегічний

ресурс України. Це важливо в умовах економічної кризи, необхідності імпортозаміщення і найсуворішої економії паливно-енергетичних ресурсів, особливо у воєнний час.

Найменування джерел	2015 (факт)	2020 (прогноз)	2025 (прогноз)	2030 (прогноз)	2035 (прогноз)
Вугілля	27,3	18	14	13	12
Природний газ	26,1	24,3	27	28	29
Нафтопродукти	10,5	9,5	8	7,5	7
Атомна енергія	23	24	28	27	24
Біомаса, біопаливо та відходи	2,1	4	6	8	11
Сонячна та вітрова енергія	0,1	1	2	5	10
ГЕС	0,5	1	1	1	1
Термальна енергія	0,5	0,5	1	1,5	2
ВСЬОГО, млн. т н.е.	90,1	82,3	87	91	96

Рис. 1.2 Структура загального постачання первинної енергії згідно Енергетичної стратегії України до 2035 року [3]

У період 2020-2050 років в Україні використання деревної біомаси залишатиметься на такому ж рівні, проте зростає частка використання соломи, стебел, лушпиння соняшника, сільськогосподарських залишків, енергокультур, рідких біопалив, твердих побутових відходів для виробництва енергії. Такий прогноз ґрунтується на розрахунках, які показують, що потенціал деревної біомаси та лушпиння соняшника в Україні у 2020 році вже використано понад 90% [22].

Однією з передумов успішного розвитку біоенергетики у будь-якій країні є наявність достатніх ресурсів біомаси. Україна має великий потенціал біомаси, у 2018 році частка біоенергетики від загального постачання енергії в Україні складає 3,4 %, а виробництво біопалива 3 млн т.н.е./рік. Основними складовими є відходи та побічні продукти сільського господарства і енергетичні культури, а внесок деревної біомаси є відносно невеликим від загального енергетичного потенціалу біомаси.

Біомаса аграрного походження залишається на сьогодні основною реальною складовою енергетичного потенціалу біомаси в Україні. Це обумовлено такими чинниками як високий розвиток сільського господарства в країні, постійне вдосконалення систем сільськогосподарського виробництва, обмежені ресурси доступної для енергетичних потреб деревної біомаси та порівняно повільний розвиток напрямку вирощування і використання енергетичних культур.

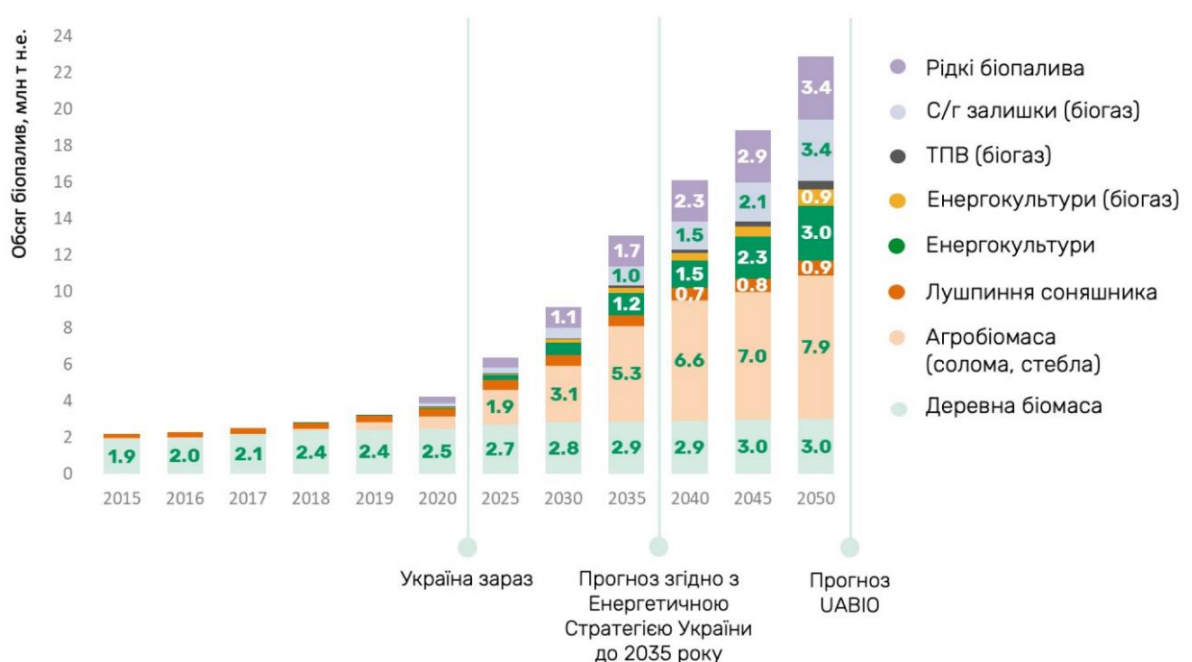


Рис. 1.3 Потенціал використання біопалива в Україні

Щодо останнього чинника, треба зазначити, що потенціал енергокультур в Україні також є значним (через наявність великих площ незадіяних сільськогосподарських земель), але має наразі, головним чином, потенційний обсяг на відміну від реально існуючих поживних решток та інших видів агробіомаси.

Лідерами енергетичного використання біомаси в Європі є Литва (33,6%), Фінляндія (33,5%), Швеція (31,9%), Естонія (26%), Латвія (22,9%). Найбільша частка біомаси у загальному внеску всіх відновлюваних джерел енергії має місце в Естонії (93,1%), Латвії (87,6%), Польщі (87,3%), Фінляндії (86,3%),

Угорщині (85,7%). За прогнозами країн-членів ЄС, загальне споживання біомаси для виробництва енергії має зрости до 140 млн. т н.е. у 2020 році. В Україні частка біоенергетики у загальній структурі споживання енергії дуже низька порівняно із ЄС. Якщо у ЄС біоенергетика займає 18-20% ринку, то у нас цей показник на рівні – 5%. Проте потенційно «зелена» електроенергія може задовольнити усі потреби населення. Україна має потенціал для десятикратного збільшення використання відновних джерел енергії. З них 73% припадає на теплову енергію, 20% – на виробництво електроенергії і 7% – на транспорт [23-24]. Майже 80% обсягу енергії забезпечуватиме біомаса, включаючи обігрів будівель і промислових підприємств (зокрема, централізоване теплопостачання), виробництво електроенергії та палива.

Таблиця 1.1 Частка аграрної біомаси, що може використовуватися для потреб енергетики

Вид біомаси, країна	Частка теоретичного потенціалу для потреб енергетики
Солома	
ЄС	25 – 50 %
Данія, Німеччина	30 %
Швеція	60 %
Естонія	15 – 65 %
Італія	40 – 60 %
США	30 – 50 %
Україна	30 % (зернові), 40 % (ріпак)
Побічні продукти виробництва кукурудзи на зерно та соняшнику	
ЄС	30 – 50 %
Швеція, Греція	60 %
Італія	40 – 60 %
США	30 – 40 %
Україна	40 %

Під час оцінки потенціалу використання побічної продукції сільського господарства для потреб енергетики вкрай важливим є врахування агротехнічних та екологічних чинників. Так, при оцінці потенціалу відчуження поживних решток (напр., соломи зернових і технічних культур), компромісна з аграрної точки зору частка біомаси, яку можна забирати з поля

(з поверненням зольного залишку від спалювання), залежно від культури складає 30-40%. Такі частки відчуження не суперечать технологіям ведення традиційного рослинництва в Україні та добре корелюються з аналогічними даними для ряду розвинених країн світу (табл. 1.1).

До того ж, в Україні вже зараз спостерігається неприродне відставання розвитку виробництва електроенергії з біомаси та біогазу з інших поновлюваних джерел, зокрема, енергії сонця і вітру, зокрема у порівнянні з тенденціями у країнах ЄС.

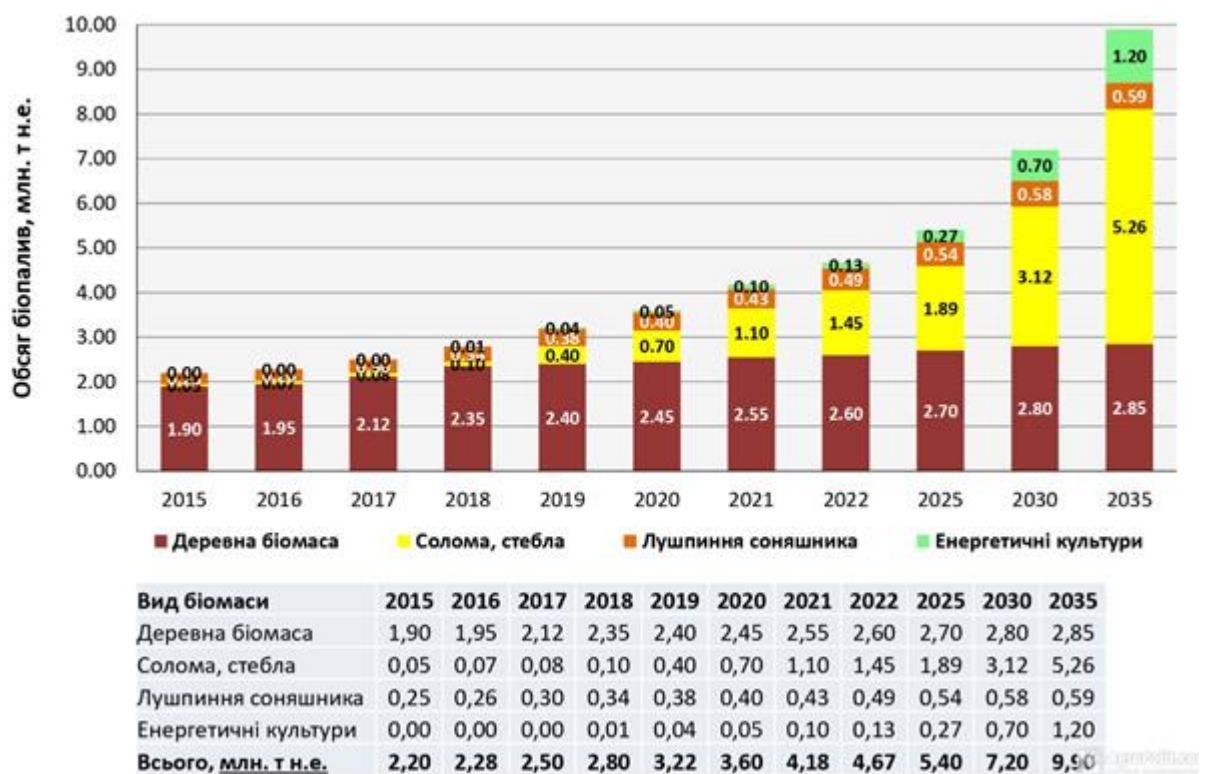


Рис. 1.4 Прогноз структури споживання твердих біопалив в Україні (2015 – 2035 рр.)

Україна щорічно виробляє від 50 до 60 млн. т зернових і зернобобових культур. При цьому, в тих самих обсягах виробляється і солома. Її в основному використовують як добриво для ґрунтів, а також у тваринництві в якості підстилки та корму тварин. Але від 20 до 30% соломи можна щорічно використовувати для альтернативного використання: прямого спалювання та використання в якості сировини для виробництва біопалива (брикети, пелети). Якщо використати потенціал всієї біоенергетики України, то обсяг заміщення

газу сягне в еквіваленті 20 млрд м³ у рік, а це 2/3 потреб країни у газопостачанні [25].

Проведені дослідження у країнах ЄС, вказують, що в енергетичних цілях можна використовувати 25–50% врожаю соломи й пожнивних решток кукурудзи на зерно, 30–50 % відходів виробництва соняшнику без негативного впливу на родючість ґрунтів. Для умов України можна використовувати усереднене значення обсягів використання з поля до 30% теоретичного потенціалу соломи зернових культур й до 40% теоретичного потенціалу відходів виробництва технічних культур (рапса, кукурудзи на зерно та соняшнику). Існують інші альтернативи енергетичного використання тюкованої аграрної біомаси, зокрема самими агровиробниками: спалювання тюкованої соломи в котлах періодичної дії, з попереднім подрібненням у котлах безперервної дії, а також теплогенераторах сушарок (на елеваторах) для сушіння зерна.

Наразі основними джерелами біомаси в Україні (якщо не брати до уваги деревину) є відходи і залишки сільського господарства (солома, стебла та стрижні кукурудзи, стебла та лушпиння соняшника), а також – у перспективі – енергетичні культури (верба, тополя, міскантус), що вирощуються спеціально з цією метою. Використання біомаси як палива при виробництві теплової енергії для забезпечення потреб в опаленні та гарячому водопостачанні дає значні економічні переваги, адже це дозволить зменшити бюджетні витрати на опалення, а також скоротити викиди парникових газів на понад 8,0 млн.т CO.

На глобальному рівні до 2050 року біомаса може забезпечити виробництво 3000 тВт/ч електроенергії, що дозволить задовольнити потреби 7,5% населення світу, а також сприятиме скороченню викидів CO до 1,3 млрд. т. на рік. Крім того, біомаса може покрити 22 ЕДж кінцевого споживання тепла в промисловості (15% загального обсягу) і 24 ЕДж у будівельній галузі (20% загального обсягу) до зазначеного року. Згідно зі звітом Міжнародного

енергетичного агентства (МЕА), тепла й електрична енергія з біомаси наразі вже може конкурувати з викопним паливом.

Вид біомаси	Теоретичний потенціал, млн. т	Потенціал, доступний для енергетики	
		Частка теоретичного потенціалу, %	млн. т н.е.
Солома зернових культур	36,1	30	3,75
Солома ріпаку	2,1	40	0,29
Побічні продукти виробництва кукурудзи на зерно (стебла, стрижні)	36,5	40	2,79
Побічні продукти вир-ва соняшника (стебла, корзинки)	25,9	40	1,48
Вторинні відходи с/г (лушпиння соняшника)	2,0	86	0,71
Деревна біомаса (дрова, порубкові залишки, відходи деревообробки)	6,6	94	1,55
Деревна біомаса (сухостій, деревина із захисних лісосмуг, відходи ОВБСН)	8,8	44	1,03
Біодизель (з ріпаку)	-	-	0,16
Біоетанол (з кукурудзи і цукрового буряку)	-	-	0,66
Біогаз з відходів та побічної продукції агропромислового комплексу	1,6 млрд. м ³ CH ₄	50	0,68
Біогаз з полігонів твердих побутових відходів	0,6 млрд. м ³ CH ₄	34	0,18
Біогаз зі стічних вод (промислових та комунальних)	1,0 млрд. м ³ CH ₄	23	0,19
Енергетичні культури:			
- верба, тополя, міскантус (1 млн. га*)	11,5	100	4,88
- кукурудза на біогаз (1 млн. га*)	3,0 млрд. м ³ CH ₄	100	2,57
Всього	-	-	21,0

* За умови вирощування на 1 млн. га незадіяних сільськогосподарських земель.

Рис. 1.5 Енергетичний потенціал біомаси в Україні

На глобальному рівні до 2050 року біомаса може забезпечити виробництво 3000 тВт/ч електроенергії, що дозволить задовольнити потреби 7,5% населення світу, а також сприятиме скороченню викидів CO до 1,3 млрд. т. на рік. Крім того, біомаса може покрити 22 ЕДж кінцевого споживання тепла в промисловості (15% загального обсягу) і 24 ЕДж у будівельній галузі (20% загального обсягу) до зазначеного року. Згідно зі звітом Міжнародного енергетичного агентства (МЕА), тепла й електрична енергія з біомаси наразі вже може конкурувати з викопним паливом.

Головні переваги – повсюдне поширення ресурсів біомаси та їх теоретична невичерпність. Основні види біомаси – деревина, деревне вугілля, сільськогосподарські та тваринницькі відходи – вже забезпечують теплом 2-3 млрд. світового населення. З посиленням екологічних норм централізованої генерації, очевидна тенденція з використання біомаси в промислових

ВИД БІОМАСИ	Теоретичний потенціал, млн т		Частка, доступна для енергетики, %		Потенціал, доступний для енергетики, млн т н.е.	
	2015	2050	2015	2050	2015	2050
Солома зернових культур	35,14	52,7	30	30	3,65	5,48
Солома ріпаку	3,1	4,7	40	40	0,43	0,65
ПП виробництва кукурудзи на зерно (стебла, стрижні)	30,3	45,5	40	40	2,32	3,48
ПП виробництва соняшнику (стебла, корзинки)	21,2	21,2	40	40	1,22	1,22
Вторинні відходи с/г (лушпиння соняшнику)	1,90	1,90	74	74	0,50	0,50
Деревна біомаса (дрова, порубкові залишки, відходи деревообробки)	6,0	9,0	94	94	1,39	2,08
Деревна біомаса (сухостій, деревина з лісосмуг, обрізки)	8,8	8,8	41	41	1,03	1,03
Біодизель (з ріпаку)	-	-	-	-	0,19	0,19
Біоетанол (з кукурудзи і цукрового буряку)	-	-	-	-	0,54	0,54
Біогаз із відходів та побічної продукції АПК	1,6*	11,2*	50	100	0,68	2,38
Біогаз із органічної частини твердих побутових відходів (ТПВ)	0,6*	5,8*	34	100	0,18	0,60
Біогаз зі стічних вод (промислових та комунальних)	1,0*	9,0*	23	100	0,19	0,39
Енергетичні культури:						
- верба, тополя, міскантус (1,5 млн га у 2015 р., 3 млн га у 2050 р.)	17,25	51,8	90	90	6,58	19,74
- кукурудза на біогаз (0,5 млн га у 2015 р., 1 млн га у 2050 р.)	1,67*	6,68*	90	90	1,29	5,15
ВСЬОГО					20,19	43,42

Рис 1.6 Енергетичний потенціал біомаси в Україні (2015 та 2050 рр.)

виробництвах. Відтак, щоб задовольнити попит, знадобиться близько 5-7 млрд тонн сухої біомаси до 2050 року для виробництва електричної й теплової енергії. Таким чином, міжнародна торгівля біомасою матиме життєво

важливе значення для задоволення попиту й потребуватиме належного функціонування ланцюга створення вартості (рисунок 1.6).

Згідно із законом України «Про альтернативні види палива», відходи, продукти, залишки і біологічно активні відновлювальні речовини сільського, лісового господарства і харчової промисловості можуть бути використані в якості палива у кількох видах. Перший – вихідна трава, трав'яна або інша біомаса. Другий – продукти виробництва з неї: пелети, брикети, гранули, тріска, деревна стружка, тирса та інша вуглецевомістка тверда речовина. Перероблення біомаси з метою отримання біопалива вимагає додаткових інвестицій, витрат енергетичних та людських ресурсів. Але вироблення із вихідної біомаси твердого, рідкого чи газоподібного біопалива дає можливість вирішити низку складних екологічних, містобудівних, протипожежних і логістичних проблем, які виникають під час проектування, будівництва та експлуатації об'єктів біоенергетики.

Дослідженням наявного потенціалу біомаси в Україні займаються Гелетуха Г.Г., Кудря С.О., Міщенко Н.М., Калініченко В.М., Дубровін В.О., Сухін Є.І. та ін.

Проблемам формування і ефективності використання сільськогосподарської сировини для виробництва біопалива присвячені наукові праці таких вчених: П.С. Вишнівського, В.І. Гавриша, О.О. Єранкіна, Н.В. Зіновчука, Г.М. Калетника, М.В. Калінчика, І.Г. Кириленко, Б.Й. Кириченко, І.В. Кушніра, О.М. Маслака, О.О. Митченка, С.А. Стасіневича, О.Г. Шайко, О.М. Шпичака та ін.

1.1.2 Нормативно-правове забезпечення підтримки та розвитку біоенергетичних технологій

Державну політику в сфері впровадження біоенергетичних технологій, здійснюють Міністерство інфраструктури України [26], Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України [27], Міністерство енергетики України [28], Міністерство економіки України [29], Державне агентство з

енергоефективності та енергозбереження України [30], Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП) [31] та ін. Основні документи в яких реалізовані нормативні положення щодо стимулювання розвитку біоенергетичної галузі та використання біопалива наведені в таблиці 1.2 [32-33].

Таблиця 1.2 Нормативно-правові документи стимулювання біоенергетики

Тип документа	Назва нормативного документа
Закони України	<ul style="list-style-type: none"> - «Про альтернативні види палива» - «Про ринок електричної енергії» - «Про альтернативні джерела енергії» - «Про теплопостачання» - «Про комбіноване виробництво теплової та електричної енергії (когенерацію) та використання скидного енергопотенціалу» <ul style="list-style-type: none"> - «Про внесення змін до деяких законів України щодо забезпечення конкурентних умов виробництва електрое-нергії з альтернативних джерел енергії» - «Про внесення змін до деяких законів України щодо сприяння виробництву та використанню біологічних видів палива»
Постанови Кабінету Міністрів України	<ul style="list-style-type: none"> - «Про затвердження Державної цільової економічної програми енергоефективності і розвитку сфери виробництва енергоносіїв з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2010–2021 роки» <ul style="list-style-type: none"> - «Про стимулювання заміщення природного газу під час виробництва теплової енергії для установ та організацій, що фінансуються з державного і місцевих бюджетів» - «Про стимулювання заміщення природного газу у сфері теплопостачання» - «Про порядок видачі свідоцтва про належність палива до альтернативного»

Серед основних нормативно-правових актів слід виділити закон України «Про альтернативні види палива», де зазначено, що відходи, продукти, залишки і біологічно активні відновлювальні речовини сільського, лісового

господарства і харчової промисловості можуть бути використані в якості палива у кількох видах. Перший – вихідна трава, трав'яна або інша біомаса. Другий – продукти виробництва з неї: пелети, брикети, гранули, тріска, деревна стружка, тирса та інша вуглецевомістка тверда речовина. Перероблення біомаси з метою отримання біопалива вимагає додаткових інвестицій, витрат енергетичних та людських ресурсів.

Розвиток сектора виробництва теплової енергії з біомаси передбачений "Енергетичною стратегією України до 2035 року" та Національним планом дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року, що схвалені Урядом. Згідно стратегії планується оптимізація структури енергетичного балансу держави, виходячи з вимог енергетичної безпеки та забезпечення частки відновлюваної енергетики на рівні 25%.

Основними інструментами стимулювання розвитку відновлюваної енергетики в країні на сьогодні є: «зелений» тариф на електричну енергію, вироблену з альтернативних джерел, який діє до 2030 року; стимулюючий тариф на тепло з альтернативних видів палива на рівні 90 % тарифу на тепло з газу. У травні 2019 року набрав чинності закон № 2712 – VIII «Про внесення змін до деяких законів України щодо забезпечення конкурентних умов виробництва електричної енергії з альтернативних джерел енергії». Закон запроваджує надання державної підтримки суб'єктам господарювання у сфері відновлювальної енергетики виключно через аукціони з розподілу квоти. Зокрема, Законом передбачено: «Зелений» тариф на електричну енергію, вироблену споживачами, у тому числі енергетичними кооперативами, з енергії сонячного випромінювання, енергії вітру, біомаси, біогазу, з використанням гідроенергії, геотермальної енергії генеруючими установками та встановлення додаткової надбавки за використання українського обладнання (Таблиця 1.3). В даній таблиці наведені питомі відсоткові показники елементів обладнання становлять на об'єктах електроенергетики, у тому числі введених в експлуатацію чергах будівництва електричних станцій (пускових комплексах), які виробляють електричну енергію з біомаси.

Таблиця 1.3 Надбавка за дотримання рівня використання обладнання українського виробництва, які виробляють електричну енергію з біомаси.

Елементи обладнання	Питомий відсотковий показник, %
Котел	25
Турбогенератор	25
Мережеві насоси/водопідігрівачі	10
Система подачі палива (конвеєри безперервної дії для подачі палива)	10
Обладнання для фільтрування або очищення газів	15
Система водопідготовки	5
Градирні/конденсатори пари	5
Станції очистки господарсько-побутових стічних вод, дощових та виробничих вод, шнекові дегідратори осаду та аналогічне устаткування	5
Разом по об'єкту	100

Враховуючи, що членство України в Енергетичному співтоваристві (з 2011 р.) вимагає від неї обов'язкового виконання низки європейських директив. По мірі поступового підписання розділів Угоди про асоціацію з ЄС обсяг зобов'язань України, в тому числі в енергетичному секторі, буде й далі збільшуватися.

Одним з головних документів ЄС в секторі відновлюваних джерел енергії є Директива 2009/28/ЕС (Директива 2009/28/ЕС щодо стимулювання використання енергії з відновлюваних джерел, внесення змін та подальшої зміни Директив 2001/77/ЕС), яку Україна згідно своїх зобов'язань в рамках Енергетичного співтовариства мала імплементувати до 1 січня 2014 року Також до розроблених нормативно-правових документів, слід віднести ряд законодавчих ініціатив направлених на розвиток біоенергетики, а саме [34]:

1) проєкт Закону України «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо сприяння розвитку сфери вирощування енергетичних рослин».

2) проєкт Закону про внесення змін до статті 288 Податкового кодексу України щодо орендної плати для земельних ділянок, на яких вирощуються енергетичні рослини

При реалізації даних проєктів, біоенергетична галузь отримає низку позитивних наслідків, зокрема:

- розвиток нового виду діяльності та внутрішнього ринку біопалива;
- скорочення викидів парникових газів за рахунок використання CO₂-нейтрального палива та заміщення викопних видів палива біомасою;
- отримання прибутку з малопродуктивних чи деградованих сільськогосподарських земель та відновлення їх родючості;
- очищення забруднених земель;
- створення нових робочих місць та наповнення бюджетів всіх рівнів, соціально-економічна стабільність регіонів;
- зміцнення іміджу держави та місцевих органів влади.

Незважаючи на наявність ряду нормативних документів, програм та планів направлених на підтримку та розвиток біоенергетики в Україні, но поки що галузь в нормативному полі знаходиться на стадії становлення. На відміну від інших Європейських країн, де реалізована чітка державна підтримка та законодавча база, яка стимулює виробництво біоенергетичного палива, вирощування енергетичної сировини та розвиток використання технологій і обладнання для спалювання біомаси.

1.2 Огляд сучасного рівня технологій спалювання агропелет

Перспективним шляхом застосування біомаси при виробництві відновлюваної енергії в країнах ЄС розглядається варіанти індивідуального опалення приміщень. Цільові показники зростання складають орієнтовно 30% кожних 3-4 роки, внесок твердої біомаси є найбільш важливим для досягнення цієї мети [35].

Тверда біомаса значною мірою використовується в домогосподарствах для опалення, причому важливу роль відіграють пелети з лісової деревини. Так, для прикладу, останні декілька років використання біомаси приватними домогосподарствами перевищує цільові показники, встановлені на перспективу на 10% [35].

Для того, щоб задовольнити зростаючий попит на використання біомаси, з ціллю виробництва енергії, тільки деревної сировини недостатньо [36,37]. Очевидно, що вже у середньостроковій перспективі з'явиться необхідність збільшувати відсоток недеревної сировини в загальному балансі використання біопелетного палива. З цієї причини відбувається диверсифікація впровадження нових ресурсів для задоволення потреб теплової енергетики. Найбільший приріст пропозиції очікується за рахунок аграрного сектору, де існує значний потенціал [38,39].

До так званих, нових ресурсів включають в основному, окрім енергетичних культур деякі види залишкової агропромислової біомаси на основі сільськогосподарських культур. Зокрема, в роботі [39] розглядається сільськогосподарська біомаса у складі: обрізки виноградників, кукурудзяної та ячмінної соломи. При оцінці за, так званими, консервативними індексами доступності (50% для обрізки виноградників і кукурудзи і 10% для ячмінної соломи), їх досяжна залишкова біомаса становить понад 500 ПДж/рік енергетичного потенціалу. Тому їх використання може значною мірою сприяти досягненню поставлених цілей.

Україна – агропромислова країна, що має великий потенціал для виготовлення та застосування пелет рослинного походження. Наприклад, в порівнянні з іншими країнами, наша держава займає 6 місце у світі по виготовленню такого виду біопалива, як пелети, але більша їх частина (близько 85%) експортується за кордон. Це пов'язано з низьким попитом на пелети на внутрішньому ринку. Солома зернових культур може застосовуватися в комунальній енергетиці. Кількість соломи, що лишається після збирання врожаю, є достатньою для можливості її використання, як

палива. Таке біопаливо за своїм складом і теплотворною здатністю наближається до таких традиційних видів палива, як деревина та торф. Солому, що призначена для спалювання в котлах, доцільно зберігати та транспортувати до кінцевого споживача (енергетичної установки) у вигляді гранул, або пелет. Рослинні пелети по елементарному складу і теплоті згоряння не дуже відрізняється від деревини, хоча їх теплота згоряння нижче, ніж аналогічний параметр сухої деревини.

Проведення досліджень з встановленням інноваційних ефективних способів та устаткування для спалювання рослинних пелет із соломи, злаків, а також січки соломи гороху, гречки або рапсу є надзвичайно важливим та актуальним не лише для України, а й для світової біоенергетики. Успішна технічна реалізація процесу спалювання пелет пов'язана з вибором раціональних технічних рішень та режимних параметрів роботи відповідного обладнання. Тому вдосконалення технологій та устаткування для спалювання біопалива аграрного походження є актуальною задачею, що обумовлена екологічним станом довкілля та необхідністю залучення в енергетику альтернативних та відновлювальних джерел енергії у зв'язку з вичерпністю та постійним зростанням цін на викопні енергоносії.

Технологічні рішення для виробництва теплової енергії з біомаси залежать від масштабу та призначення теплогенеруючих установок, а також виду біомаси, що використовується як паливо. Технології спалювання біомаси розділяють на три основні типи: спалювання в шарі, пилове спалювання, спалювання в псевдозрідженому стані, а також комбінований тип – сумісне спалювання біомаси з іншими паливами (рисунок 1.7) [40].

При спалюванні рослинних пелет виникає проблема прояву низької температури плавлення отриманої золи і, внаслідок цього, закупорки (заплавлення, закоксування) подових колосникових решіток традиційних котлів об'ємного спалювання в класичній топці. Тому такі властивості рослинних пелет (велика кількість золи та її низька температура плавлення) унеможливають застосування для цих цілей звичайних пелетних котлів.

Агропелети мають зольність, що більш ніж в 10 разів перевищує зольність деревних пелет, і зола з низькою температурою плавлення, що в цілому ускладнює роботу котельного обладнання і знижує його надійність.



Рис. 1.7. Технології спалювання біомаси [40]

Сьогодні питання впровадження технологій енергетичного використання біомаси та заміщення викопних палив, в першу чергу природного газу, набуває все більшої актуальності. Основними напрямками, практичне впровадження яких розвивається найбільшими темпами, є технології прямого спалювання деревини у вигляді, дров, відходів деревообробки, тріски та гранул або пелет. Ряд вітчизняних компаній вже освоїли випуск котлів для спалювання деревини як для побутового використання, так і для промислових споживачів. Проте, енергетичне використання відходів сільського господарства, енергетичний потенціал використання яких суттєво більший, поки стикається з рядом проблем, однією з яких є відсутність доступного обладнання для спалювання таких палив, як солома зернових, відходи кукурудзи та соняшника. Особливо актуальною є розробка пристроїв для спалювання цих палив в стаціонарному режимі, оскільки котли періодичної дії (наприклад, для спалювання цілих тюків соломи) мають досить обмежену сферу застосування.

Біопаливні агоророслинні пелети (гранули) та брикети в економічних умовах України доцільно транспортувати на відстань до 100...150 км, вони не набирають вологу, не гниють і не втрачають свої паливні властивості під час зберігання, найбільш придатні до механізованого (автоматизованого) завантаження в енергетичну установку. Весь процес переміщення гранул від виробника до споживача здійснюється без застосування ручної праці.

Розширення практики використання пелет аграрного походження для теплозабезпечення побутовими споживачами необхідно розглядати як стратегічно важливий напрямок для досягнення енергетичної незалежності України та розбудови енергоефективної економіки, що відображає об'єктивні процеси, які відбуваються в енергетичному секторі України та світу, ґрунтуючись на екологічних, економічних та політичних чинниках.

В Україні за два роки газ подорожчав більше, ніж в 10 разів: з 0,72 грн до 8,55 грн за кубічний метр. При цьому, експерти відзначають, що ціна на цьому не зупиниться, адже тариф прив'язаний до вартості імпортного газу і залежить від курсу долара.

Дрова мають такі недоліки, як велика площа для зберігання, неможливість автоматизувати процес завантаження в котел, висока зольність, використання ручної праці.

Недоліки вугілля в тому, що воно стало дорогим і менш доступним, потребує спеціальних складських приміщень, екологічно менш чисте, з високою зольністю.

Мазут і дизельне паливо не вигідні економічно, до того ж потребують особливого зберігання.

Стає очевидним, що пелети (паливні гранули) – єдиний вид палива, який може бути справжньою альтернативою природному газу. Тільки пелети мають стабільно високу якість, безпеку, екологічність і найголовніше - можливість автоматизувати управління процесом горіння.

Паливні пелети (гранули) є екологічно чистим видом палива. При спалюванні пелет в атмосферу викидається стільки ж вуглекислого газу,

скільки утворилося при природному розкладанні деревини. Застосовуються для спалювання в пелетних котлах. Одне з найважливіших переваг пелет – висока і постійна насипна щільність, що дозволяє відносно легко транспортувати цей сипкий продукт на великі відстані. Завдяки правильній формі, невеликому розміру і однорідної консистенції пелети можна пересипати через спеціальні рукави, що дозволяє автоматизувати процеси завантаження-розвантаження і спалювання.

При спалюванні соломи в котлах можна забезпечити гаряче водопостачання та тепло для опалення приміщень. Ці процеси забезпечується автономними незалежними системами опалення. Такі системи можуть бути малими або великими та можуть використовуватись для приватних будинків, а також для великих районів або підприємств[41].

Солома є екологічно безпечним джерелом енергії. У процесі росту соломи поглинається така ж кількість вуглецю, яка виділяється при її спалюванні. Солома є місцевим паливом, досить розповсюдженим у сільськогосподарських районах і відносно дешевим, порівняно з традиційними. Так, верхня теплотворна здатність соломи (суха речовина) складає 4,9 кВт год/кг. Для типової вологості 15% нижня теплотворна здатність складає 4,1 кВт год/кг. Кількість енергії, що міститься в 1 м³ ущільненої тюкової соломи, складає до 450 кВт год (щільність до 130 кг/м³). В Україні найбільш перспективними, для використання в найближчі роки, можна вважати соломоспалюючі фермерські котли та котли для малих тепломереж потужністю 0,1–1 МВт. Але широке використання цих технологій потребує вирішення ряду питань організації збору, пресування тюків, транспортування та зберігання соломи. Також невирішеними залишаються питання, щодо рівномірності горіння соломи в топці котла.

В Україні, найбільшою перешкодою для енергетичного використання соломи є обмеженість досвіду та необхідних інвестицій. Іншими перешкодами можуть бути:

1. необхідність розвитку ринку соломи з привабливими цінами як для споживачів, так і для постачальників;
2. наявність пестицидів може призвести до збільшення вмісту хлору в соломі. Проте, якщо солома витримується на полях на протязі певного періоду (зів'янення) то вміст хлору досягає низьких значень.

Ще однією важливою перешкодою для використання соломи в якості палива служить відсутність придатних для її спалювання топків. Суха (вологістю до 25%) солома добре горить у всіляких топках, однак її ККД (особливо при неповному завантаженні) досить низький і складає 45%. Проте значна неоднорідність біомаси, з точки зору хімічного складу та фізичних властивостей, викликає певні труднощі, як в процесі спалювання, так і емісії компонентів, які є побічними продуктами процесу. Характеристика соломи в залежності від технології їх підготовки до спалювання наведена в табл. 1.4.[42]

Таблиця 1.4 Характеристика твердих видів біопалива в залежності від технології їх приготування до спалювання.

Вид соломи	Об'ємна маса (щільність), кг/м ³	Питомий об'єм, м ³ /т	Питома енергомісткість, МВт/м ³
Звичайна солома	20-50	20-50	0,7-0,16
Подрібнена солома (січка)	40-60	16-25	0,13-0,19
Великі прямокутні паки	70-130	7,7-14	0,23-0,43
Круглі паки	60-90	11-16	0,19-0,29
В'язанки	50-110	9-20	0,16-0,36
Брикети	300-450	2,2-3,3	0,99-1,48
Пеллети	350-500	1,9-3,0	1,1-1,6

Фізичні особливості соломи, як енергоносія представлені в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 Вплив вологості на теплоту згорання біомаси

Матеріал	Спосіб висушування	Вологість, %	Теплота згорання, МДж/кг
Солома зернових	одразу після збирання	15-20	12-15
	висушена на повітрі	14-17	14-15
Солома ріпакова	одразу після збирання	30-40	10-12
	висушена на повітрі	17-20	14-15
Стебло кукурудзи	одразу після збирання	45-60	5-8
	висушена на повітрі	15-18	15-17

1.2.1 Котли для спалювання агропелет

Розвиток технологій та обладнання для виробництва біопаливних пелет (гранул) та брикетів започаткував створення нових типів котлів з повною механізацією процесу завантаження палива і автоматизацією контролю процесу горіння.

В Україні понад 100 виробників на біомасі. Глибина номенклатури окремих виробників досягає 100 найменувань. Найбільша кількість пропозиції стосується котлів до 100 кВт.

Регіон	За КВЕД	На біомасі	Потужність			Вид палива			
			<0,1 МВт	0,1 -1,0 МВт	>1 МВт	Агро	Дрова	Тріска	Гранули
Центр України									
Вінницька	4	3	3	1	-	-	3	-	2
Дніпропетровська	7	1	1	1	-	-	-	-	1
Кіровоградська	2	1	1	1	-	-	1	-	1
Полтавська	1	2	1	2	1	1	2	1	1
Черкаська	4	3	2	3	1	2	2	1	-
Хмельницька	8	5	3	4	1	1	5	1	2
Схід									
Харківська	9	12	8	7	3	2	11	6	5
Донецька	2	-	-	-	-	-	-	-	-
Луганська	2	1	1	-	-	-	1	-	-
Захід									
Івано-Франківська	2	1	1	-	-	-	1	-	1
Львівська	6	6	5	3	2	-	6	1	3
Тернопільська	1	1	1	1	-	-	1	-	1
Рівненська	7	12	9	10	5	4	11	5	8
Чернівецька	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Волинська	1	2	2	1	1	-	2	1	1
Південь									
Миколаївська	2	1	1	-	-	-	1	-	1
Одеська	5	6	5	3	2	1	4	3	5
Запорізька	1	4	4	-	-	-	4	-	-
Північ									
Житомирська	8	7	4	4	4	-	6	4	4
Сумська	2	4	3	4	-	-	3	-	3
Чернігівська	3	5	5	5	1	-	5	1	4
Київська	22	25	20	18	6	5	20	13	20
Усього	101	102	80	68	27	16	89	37	63

Рис. 1.8 Кількість виробників котлів на біомасі за регіонами

На даному етапі розробки концепції для 2020 року та 2030 року в неї не включено теплову енергію від біогазових установок. В подальшому обсяги корисного споживання теплової енергії, виробленої біогазовими установками, будуть збільшуватися, і це буде враховано в наступних версіях концепції[43].

Впровадження біоенергетичних технологій має позитивний соціально-економічний вплив на регіони, де воно реалізується.

По-перше, при використанні біомаси як палива гроші за імпортовані енергоносії не потрапляють до країн-експортерів, а залишаються на місці і працюють на розвиток місцевої економіки.

По-друге, впровадження технологій виробництва енергії з біомаси сприяє створенню нових робочих місць, необхідних для виробництва та обробки біомаси, виробництва і транспортування біопалив та обслуговування біоенергетичного обладнання. Це особливо важливо для сіл з точки зору підвищення рівня зайнятості населення.

За існуючих цін на викопні палива, теплової енергії і біомасу впровадження котлів на біомасі для виробництва тепла є економічно доцільним і може рекомендуватися для об'єктів теплоенергетики в промисловому і бюджетному секторах.

Реалізація таких проєктів у ЖКГ перебуває на межі рентабельності. Термін окупності проєктів з впровадження котлів на деревині та соломі становить два-три роки для промислового та бюджетного секторів і більше семи-десяти років – для ЖКГ (таблиця 1.6).

Основні відмінності полягають саме в організації процесу спалювання біомаси, що має свої особливості залежно від виду біомаси. Своєю чергою процес спалювання накладає певні вимоги на конструкцію топки, спосіб подачі палива тощо.

Таблиця 1.6 Концепція впровадження біоенергетичного обладнання для виробництва тепла в Україні до 2030 року

Тип обладнання	Ємність ринку, од	Потужність, МВт	Заміщення газу, млрд м куб на рік	Інвестиційні витрати, млн грн
Населення				
Традиційні пічки на дровах	50 000	500	0,20	150
Побутові котли на дровах і гранулах	80 000	2 400	0,97	1 920
Котли на соломі та стеблах	1 100	2 200	0,89	2 200
<i>Всього</i>	<i>131 100</i>	<i>5 100</i>	<i>2,06</i>	<i>4 270</i>
ЖКГ та бюджетна сфера				
Котли на деревині	2 500	1 250	0,51	1 250
Котли на соломі та стеблах	1 400	2 800	1,13	9 800
ТЕЦ на деревині	10	300	0,12	1 800

Продовження таблиці 1.6

ТЕЦ на соломі та стеблах	50	1 770	0,72	9 000
ТЕЦ на ТПВ	50	1 770	0,72	9 000
ТЕЦ на біомасі енергетичних культур	50	1 770	0,72	9 000
<i>Всього</i>	<i>4 060</i>	<i>9 660</i>	<i>3,91</i>	<i>39 850</i>
Промислові та комерційні споживачі				
Котли на деревині	400	400	0,31	400
Котли на соломі та стеблах	1 300	650	0,50	650
Котли на лушпинні соняшника	55	440	0,34	440
ТЕЦ на деревині	10	300	0,11	1 800
ТЕЦ на лушпинні соняшника	20	600	0,23	3 600
<i>Всього</i>	<i>1 785</i>	<i>2 390</i>	<i>1,48</i>	<i>6 890</i>
Загалом	136 945	17 150	7,45	51 010

1.2.2 Класифікація пальників та принцип їх роботи

Технології спалювання біомаси розділяють на три основні типи: спалювання в шарі, пилове спалювання, спалювання в псевдозрідженому шарі, а також комбінований тип – сумісне спалювання біомаси з іншими паливами. В Україні досвіду застосування добавок та сумісного спалювання біомаси з вугіллям на електростанціях наразі нема.

В якості опалювального обладнання, в залежності від потужності та виду палива, можуть використовуватись котли та теплогенератори з ручним або автоматичним завантаженням палива. Як правило, при потужностях до 2 МВт спалювання сипких деревних відходів і гранул реалізується в котлах з автоматичною подачею та відбувається в спеціальному пальнику або реторті з нижньою чи верхньою подачею сировини. При потужності від 800 кВт часто встановлюють котли з похило-перештовхувальними решітками.

Надійність роботи котла при зміні погодних умов досягається підбором такої потужності, що обумовлює якомога довшу його роботу із стабільною продуктивністю (в базовому режимі). Пікові теплові навантаження мають забезпечуватись котлами на газовому або рідкому паливі, що підключені до

системи опалення паралельно до котлів на біомасі. Встановлена теплова потужність котлів на біомасі при цьому може складати від 40 до 70% розрахункового теплового навантаження споживачів, що більш точно може бути визначено техніко-економічним обґрунтуванням. Котел на біопаливі може бути встановлений як в існуючій котельні, при наявності вільного місця для розміщення обладнання паливоподачі, так і у вигляді окремої модульної котельні

Для підвищення ефективності роботи котлів, за рахунок зменшення часу роботи в перехідних режимах, необхідне використання автоматичної системи керування подачею повітря в топку, що складається із мікропроцесорного пристрою, датчика температури, встановленого в нагрівну порожнину котла та датчика вмісту CO в димових газах, встановленого в патрубках для видалення продуктів згорання.

Пелетний пальник є складовим елементом твердопаливного котла та основною його частиною. Перехід на такі пристрої для опалення сьогодні особливо актуальне через їх екологічність та в зв'язку з поступовим виснаженням природних ресурсів таких як нафта і газ. Виділення вуглекислого газу при горінні пелет, відповідає нормам, не порушуючи балансу CO в навколишньому середовищі.

Пелетний пальник [44] застосовується в побутових обігрівальних системах, що працюють на гранульованому паливі (пелетах) від сільськогосподарських переробок. Пелетний пальник включає корпус 1, який виготовлений у вигляді труби з крутозігнутим відводом, на кінці якого розташована головка 2 збільшеного діаметру з двома підводами 3, 4 повітря (рисунок 1.8). Інший кінець корпусу 1 розташований у порожнині обичайки 5. Порожнина обичайки має вхідне вікно 6 і вихідні патрубки 7, 8. Корпус 1 й обичайка 5 з'єднані фланцем 9, у якому є вікно 10. На головці 2 корпусу 1 розташований колектор 11. Внутрішня частина колектора 11 виконана у вигляді тарілки. По колу ввігнутого колектора 11 розташовані отвори 12. У середній частині до колектора 11 прикріплений зубчастий диск 13, що

взаємодіє із кулісним 14 і кулачковим 15 механізмами. Кулачковий механізм 15 розташований на валу 16, що виходить із порожнини корпусу 1. У середині порожнини корпусу 1 на валу 16 установлений шнек 17. Шнек кінематично пов'язаний із електрорегулюючим приводом 18 зубчатою передачею 19 та редуктором 20. Крім того, головка 2 корпусу 1 і колектор 11, у нижній їхній частині, мають по два радіальних канали 21. На виході з порожнини корпусу в порожнину колектора встановлений запальник 22.

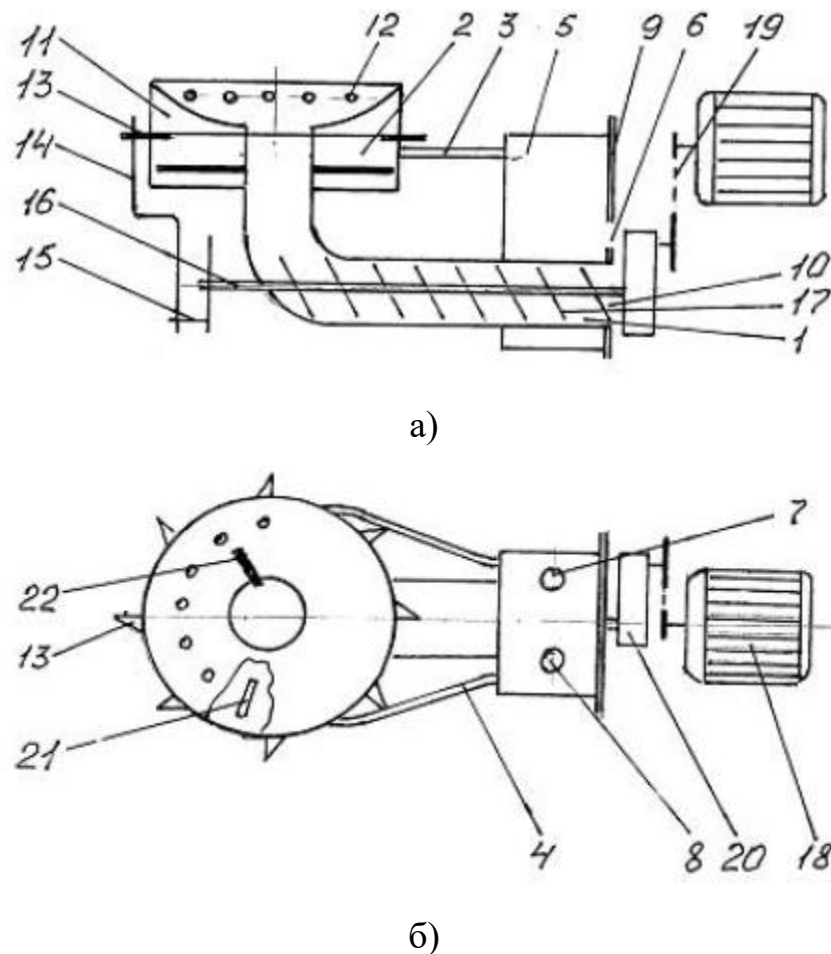


Рис. 1.8 Пелетний пальник: а) вигляд спереду; б) вигляд зверху

Пелетний пальник працює так (рисунок 1.8)

Електрорегулюючим приводом 18 через редуктор 20 та зубчасту передачу 19 обертається вал 16 зі шнеком 17, подає в порожнину корпусу гранульоване паливо. На поворотній ділянці корпусу 1 гранули піднімаються нагору, займають порожнину головки 2 й входять у порожнину колектора 11 в зону горіння. У цій зоні гранули обдуваються повітрям по всій окружності,

відбувається інтенсивне горіння. У процесі горіння, через обдув периферії вогнища горіння, його зовнішні шари згоряють інтенсивніше в порівнянні із серединою. Крім того під час горіння, колектор 11 робить переривчастий обертовий рух. Струмки повітря, що вийшли з отворів 12 колектора 11, копіюють рух і сприяють горінню гранул у застійних зонах вогнища. Таким чином, вогнище має вигляд правильного конуса з округленою вершиною. Гранули, у процесі горіння, змінюють форму, розпадаються й перетворюються в попіл. Основна частина попелу повітрям виноситься із зони колектора 11, а якась мінімальна частина попелу може потрапити у внутрішню порожнину колектора 11 й головки 2. А так, як колектор переривчасто рухається, то попіл вийде через радіальні канали 21 колектора 11 й головки 2. Переривчастий рух колектора здійснюється зубчастим диском 13 і дією на нього кулісного 14 і кулачкового 15 механізмів. На кулачковий 15 механізм діє вал 16, що є продовженням шнека 17. При роботі пальника, корпус у розширеній частині нагрівається й передається тепло в середню частину. Однак, частина корпуса, що розташована в порожнині обичайки, прохолоджується повітрям, що надходить від вентиляційної установки. Підігрите повітря через патрубки йде в котел на підтримку горіння не згорілих летучих фракцій гранульованого палива.

Недоліком даного пелетного пальника є недосконалість процесів горіння в ньому, яка полягає у нерівномірності випалювання пелетів, а також у відсутності механізмів періодичного перемішування палива в процесі горіння та відведення золи.

Виконання топки пелетного пальника з можливістю обертання за допомогою додаткового мотора-редуктора дає змогу періодично перемішувати паливо (пелети) в процесі горіння, що підвищує якість спалювання палива та рівномірне нагрівання топки (рисунок 1.9) [45]. А виконання монтажної панелі роз'ємною (з можливістю роз'єднання та з'єднання) забезпечує доступ до топки та основних вузлів пальника без його демонтажу.

Така технологія спалювання палива дозволяє спалювати пелети низької якості. За умови правильного налаштування параметрів пальника під особливості даного палива, обслуговування зводиться тільки до поповнення палива в модулі подачі пелет і своєчасного відбору золи.

На рисунку 1.9 а) зображено зовнішній вигляд пелетного пальника, на рисунку 1.9 б) – зовнішній вигляд пелетного пальника з відсутньою частиною корпусу, а на рисунку 1.9 в) – фотографічне зображення монтажної панелі пелетного пальника в роз'єднаному вигляді.

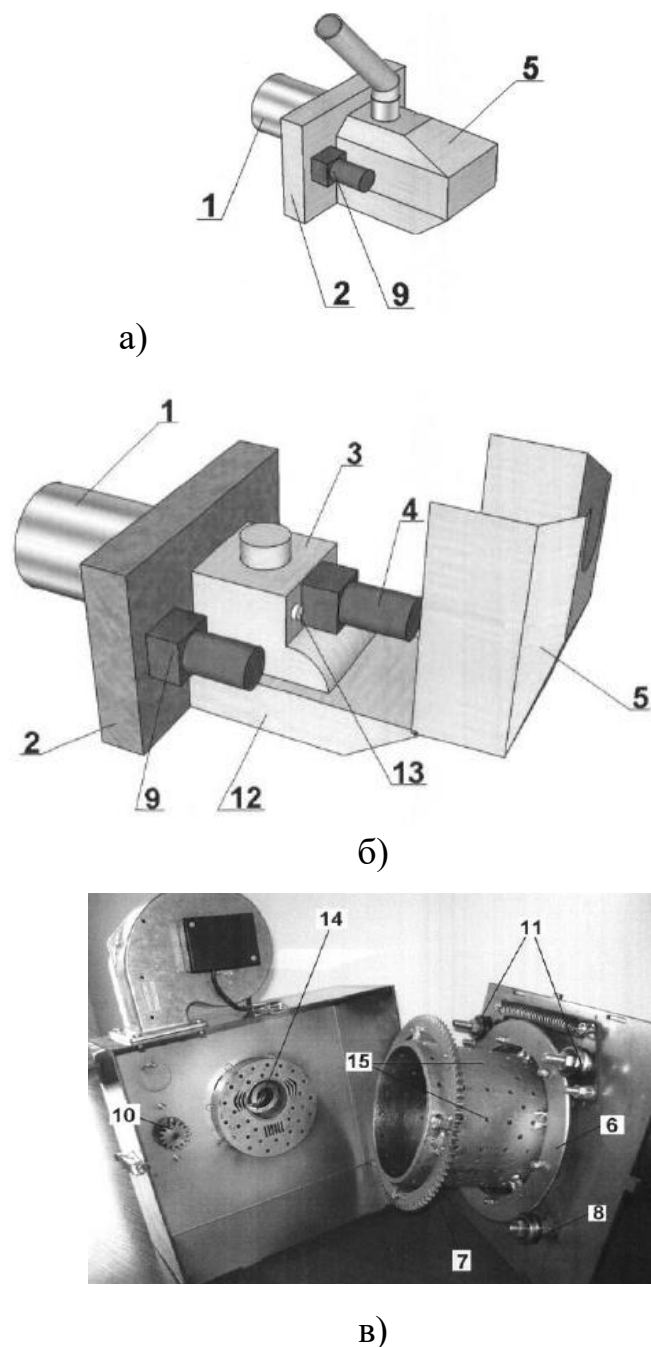


Рис. 1.9 Пелетний пальник

Пелетний пальник (рисунку 1.9) складається зі з'єднаних між собою топки 1, роз'ємної монтажної панелі 2 з вбудованим запальником, модуля подачі пелет 3 з спіральним шнеком 14, що приводиться в дію мотором-редуктором 4 та вентилятора 12. При цьому всі елементи покриває корпус із нержавіючої сталі 5. Модуль подачі пелет 3 з'єднаний з вентилятором 12. Топка 1 має подвійну трубчасту форму, одна частина якої знаходиться всередині роз'ємної монтажної панелі 2, і до цієї частини жорстко прикріплені опорний диск 6 та ведене зубчасте колесо 7. При цьому опорним диском 6 топка 1 розміщена на опорних роликах 8 та зафіксована притискним роликом (або роликами) 11. Топка 1 виконана з можливістю обертання за допомогою додаткового мотора-редуктора 9, на валу якого знаходиться ведуча шестірня 10. Опорний диск 6, опорні 8 та притискні 11 ролики, ведуче 7 та ведене 10 зубчаті колеса знаходяться всередині монтажної панелі 2, яка виконана у формі легкороз'ємного короба. Роз'ємна монтажна панель 2 (рисунок 1.9 в)) полегшує доступ до топки 1 та основних вузлів пальника без його демонтажу.

Внутрішня труба топки 1 виготовлена із жаростійкої нержавіючої сталі марки 20Х23Н18 та має отвори 15 для нагнітання вторинного повітря в зону горіння. В пальниках потужністю від 80 кВт використовується додатковий вентилятор в окремому корпусі (або декілька вентиляторів) для подачі вторинного повітря в топку 1.

Пелетний пальник працює наступним чином.

Пелетний пальник встановлюють в діючих котлах центрального опалення. Найбільш поширений і рекомендований спосіб монтажу – в дверцятах котла. Для управління даним пальником використовують блок керування, який знаходиться в окремому корпусі та встановлюється в зручному місці (на котлі, стіні або бункері), тобто на безпечній відстані від нагрівальних елементів системи опалення.

Спочатку (рисунок 1.9) вмикається вентилятор 12 для провітрювання модуля подачі пелет 3 та топки 1 від накопичених газів. Потім подається стартова порція палива за допомогою спірального шнека 14, який приводиться

в рух мотором-редуктором 4 з певною періодичністю (залежить від потужності пальника) і вмикається запальник. Запальнику потрібно кілька хвилин для розпалювання палива. Запалювання палива здійснюється потоком гарячого повітря нагрітого до 500 °С. Виявлення полум'я здійснюється за допомогою фотосенсора 13, який постійно аналізує його наявність в топці 1.

Коли пальник виходить на робочий режим, мотор-редуктор 9 із заданою періодичністю обертає ведучу шестірню 10, яка приводить в рух зубчате колесо 7 разом із топкою 1. Час обертання та час простою топки 1 залежать від особливостей конкретного виду палива та налаштовуються індивідуально.

Таким чином використання в запропонованому пальнику обертової конструкції топки та роз'ємної монтажної панелі дає наступні переваги:

- періодичне перемішування палива в процесі горіння підвищує ефективність його спалювання та запобігає утворенню шлаку;
- відбувається рівномірне нагрівання топки (відсутні зони локального нагріву);
- пальник є самоочисним;
- роз'ємна монтажна панель полегшує доступ до топки та основних вузлів пальника без його демонтажу.

Також в пелетних пальниках використовується механізм для їх чищення [45]. Даний механізм може бути застосований в будь-яких пелетних пальниках факельного типу з циліндричною або прямокутною формою топки.

Застосування запропонованого механізму показано на рисунку 1.10, де схематично показано виконання механізму у факельному пелетному пальнику з циліндричною формою топки.

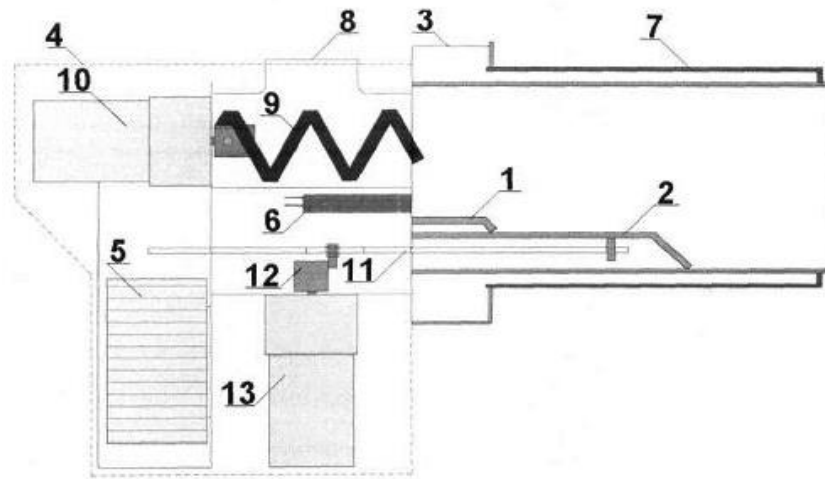


Рис. 1.10 Пелетний пальник

Факельний пелетний пальник являє собою пристрій для автоматичної подачі та спалювання пелет в твердопаливних котлах центрального опалення. Пальник складається з модуля подачі пелет 4 інтегрованого з вентилятором 5, роз'ємної монтажної панелі 3 із вмонтованим запальником 6 та топки 7 циліндричної форми. За допомогою шнекової подачі пелети подаються з бункера до пальника. Модуль подачі пелет подає пелети до топки 7 на колосникові решітки 1 та 2, де і проходить їх спалювання. Запалювання палива здійснюється за допомогою потоку гарячого повітря, нагрітого до 500 °С. Виявлення полум'я здійснюється за допомогою фотосенсора, який постійно аналізує його наявність в топці. Вентилятор 5 нагнітає повітря до топки через отвори у внутрішній трубі та решітках. Всіма процесами в пальнику управляє електронний блок керування розміщений в окремому корпусі. Модуль подачі пелет 4 являє собою металічний трійник 8 із спіральним шнеком 9, який приводиться в рух за допомогою мотор-редуктора 10. Топка 7 пальника має подвійну трубчасту форму. Всередині топки 7 пальника розміщена пара колосникових решіток таким чином, що верхня решітка 1 закріплена нерухомо з'єднана з стінкою монтажної панелі 3, а нижня 2 перебуває в періодичному зворотно-поступальному русі. Завдяки цьому шлак та зола утворені в процесі спалювання пелет автоматично видаляються з топки 7 пальника, не перешкоджаючи процесу горіння. Внутрішня труба топки і колосникові

решітки 1 та 2 виготовлені із жаростійкої нержавіючої сталі 20×23Н18 і мають отвори для проходження повітря.

Механізм приводу рухомої решітки являє собою (рисунок 1.11) тягу з рамкою 11, яка приводиться в рух за допомогою ексцентрика 12 на валу мотор-редуктора 13. Обертний рух вала мотор-редуктора 13 перетворюється у зворотно-поступальний і решітка 2 приводиться в рух в горизонтальному напрямку. Механізмом приводу може бути будь-який механізм такий, що може надати решітці 2 зворотно-поступального руху, наприклад лінійний актуатор, електромеханічний привід, кривошипно-шатунний механізм і інші.

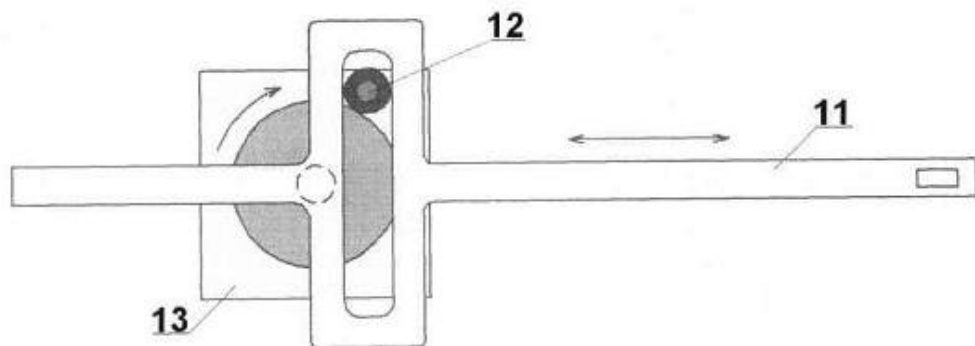


Рис. 1.11 Механізм приводу рухомої решітки

Пальники що пропонуються на ринку України, можна встановлювати в будь-який твердопаливний котел. В них передбачена плавна модуляція потужності, що дозволяє економно спалювати паливо в залежності від потреби. Пальники виготовлені з високоякісної нержавіючої жароміцної сталі в поєднанні з вогнетривкими керамічними плитками, які забезпечують більш чисте горіння з низькою емісією викидів. Передбачене автоматичне золовидалення. Опалення на пелетах можна застосовувати не тільки для індивідуальних будинків, а й для промислових та муніципальних об'єктів (цехів, гаражів, магазинів, готелів, шкіл, дитсадків тощо).

Характеристики палива, вартість обладнання та потужність енергетичної станції є визначними показниками під час вибору технології спалювання для впровадження. Спалювання біомаси відбувається в топках котлів, а тепло, що виділяється, передається теплоносіям (воді, парі або

повітря) частково в самій топці, а частково – від продуктів згоряння, які з топки протягом свого руху контактують з конвективними поверхнями теплообміну та поступово віддають тепло теплоносіям. Основні відмінності полягають саме в організації процесу спалювання біомаси, що має свої особливості залежно від виду біомаси. Своєю чергою процес спалювання накладає певні вимоги на конструкцію топки, спосіб подачі палива тощо.

Головна проблема спалювання пелет з соломи злакових культур полягає у відносно низькій температурі розм'якшення та розплавлення золи, яка утворюється в процесі горіння пелет цього виду. У випадку спалювання пелет з деревини ця проблема не стоїть так гостро. Зольність пелет з деревини – нижча, ніж у пелет з соломи, а температура розм'якшення та плавлення – більш висока. Тому при їх спалюванні зола просипається крізь колосники і не захаращує прохід для повітря та димових газів. У випадку спалювання пелет з сільськогосподарських відходів, їх поверхня швидко покривається кіркою, яка ускладнює вихід піролізних газів з середини гранул та проникнення кисню у середину частинок, що перешкоджає горінню вуглецевого залишку. Внаслідок цього гранули повністю не згоряють, а їх залишки осідають на поверхнях колосників. На цих поверхнях утворюються конгломерати з розм'якшеної золи, смоли, що не розклалася внаслідок піролізу, та недогорілих гранул. Процес горіння в пальнику уповільнюється, а температура в камері пальника зменшується. Внаслідок цього конгломерати з розплаву золи твердіють та майже повністю перекривають прохід для повітря та димових газів через протоки.

Спалювання в шарі є основною технологією спалювання біопалива та конструктивно включає: паливну решітку, на якій відбувається процес горіння, паливо-живильний пристрій (механічний, гідравлічний чи пневматичний), системи подачі повітря та видалення золи. Первинне повітря подається під решітку і через отвори проникає в шар палива, де викликає процес газифікації горючих газів. Вторинне повітря подається над шаром палива (в зону окислення) й супроводжує процес згоряння. Зола, що

утворилась у процесі спалювання, періодично видаляється шляхом струшування, зіскрібання, зрушення або чищення. При спалюванні твердих біопалив із різним фракційним складом, підвищеним вмістом золи, сумішей різних видів палив використовують котли з киплячим (при тепловій потужності понад 5 МВт) або циркулюючим киплячим шаром (більше 20 МВт) [46].

Для підвищення ефективності роботи котлів, за рахунок зменшення часу роботи в перехідних режимах, необхідне використання автоматичної системи керування подачею повітря в топку, що складається із мікропроцесорного пристрою, датчика температури, встановленого в нагрівну порожнину котла та датчика вмісту СО в димових газах, встановленого в патрубках для видалення продуктів згорання.

1.3 Висновки до першого розділу та завдання дослідження

1. Проведені дослідження у країнах ЄС, вказують, що в енергетичних цілях можна використовувати 25-50% врожаю соломи й пожнивних решток кукурудзи на зерно, 30-50 % відходів виробництва соняшнику без негативного впливу на родючість ґрунтів.

2. Для умов України можна використовувати усереднене значення обсягів використання з поля до 30% теоретичного потенціалу соломи зернових культур й до 40% теоретичного потенціалу відходів виробництва технічних культур (рапса, кукурудзи на зерно та соняшнику).

3. При спалюванні пелет аграрного походження в котлах можна забезпечити гаряче водопостачання та теплоту для опалення будівель. Ці процеси забезпечується автономними незалежними системами опалення. Такі системи можуть бути різної теплопродуктивності та можуть використовуватись для приватних будинків, а також для великих районів або підприємств

4. Розширення практики використання пелет аграрного походження для теплозабезпечення побутовими споживачами необхідно розглядати як стратегічно важливий напрямок для досягнення енергетичної незалежності України та розбудови енергоефективної економіки, що відображає об'єктивні процеси, які відбуваються в енергетичному секторі України та світу, ґрунтуючись на екологічних, економічних та політичних чинниках.

Тому **метою дисертаційної роботи** є розробка та вдосконалення пальників для спалювання пелет сільськогосподарського походження, визначення основних закономірностей процесу їх горіння й дослідження впливу режимних параметрів на тепловий стан топкової камери котла малої потужності.

Для вирішення поставленої мети пропонуються наступні завдання:

- дослідження аеродинамічних та тепломасообмінних процесів при спалюванні різних видів рослинних пелет в пальниках котлів малої потужності;
- моделювання горіння пелет у побутових котлах малої потужності з використанням програмного комплексу ANSYS-Fluent;
- експериментальні дослідження процесів теплообміну та горіння в спарці пальник – котел при використанні різних агропелет;
- проведення порівняння результатів чисельного моделювання з експериментальними даними для визначення співпадіння та підтвердження придатності розрахункових моделей;
- розробка рекомендацій для підвищення ефективності горіння та модернізації пальників і котлів малої потужності для різних сфер використання агропалива, включаючи комунальну теплоенергетику, промисловість, соціально-бюджетні установи та індивідуальний сектор.

РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Експериментальні дослідження спалювання рослинних пелет

Результати експериментальних досліджень проводилися з метою визначення теплофізичних характеристик процесів спалювання біопалива в котлах. За результатами експериментів визначалися розподіли температури в топковому просторі котлів. Досліджувалися також концентрації продуктів згоряння в димових газах в залежності від конструкційних особливостей котла, від температурних режимів в котлах та ін. Визначався вплив швидкості та температури повітря, що вводиться в топкову камеру, а також способу введення на температурні характеристики процесу спалювання рослинної сировини. Ці дослідження розглядалися при спалюванні рослинних пелет в побутових водогрійних котлах малої потужності, що використовуються для опалення будинків.

2.1.1 Експериментальні дослідження по визначенню теплофізичних характеристик процесу спалювання пелетного палива в насипному шарі

Експериментальні дослідження по визначенню теплофізичних характеристик процесу спалювання пелетного палива в насипному шарі проводяться з використанням пелетного пальника марки Пеллетрон-15. Цей пальник призначений для застосування в системах опалення житлових, офісних або виробничих приміщень шляхом його приєднання до твердопаливних котлів.

Схематичне зображення пелетного пальника Пеллетрон-15 у розрізі наведено на рисунку 2.1. До його основних конструктивних елементів відносяться: корпус пальника (1), який має форму каналу прямокутного перерізу 88*74 мм; канал подачі пелетного палива (2) прямокутної форми з перерізом 68*68 мм, до якого приєднується паливний бункер. В цьому каналі містяться отвори для постачання первинного повітря в камеру згоряння.

Камера згоряння, тобто область корпусу пальника де безпосередньо знаходиться паливо та протікає процес його горіння, обмежується перфорованою решіткою (3) та рухомих дроселем (6) з щілинами. Корпус пальника знаходиться в металевому кожуху (4) з полірованими (для зменшення втрат теплоти за рахунок випромінювання) зовнішніми поверхнями. Корпус прикривається дверцятами (5) з круглим отвором для подачі вторинного повітря. Пальник виготовлено з жаростійких сталей 12Х18Н10Т, 20Х23Н18Т.

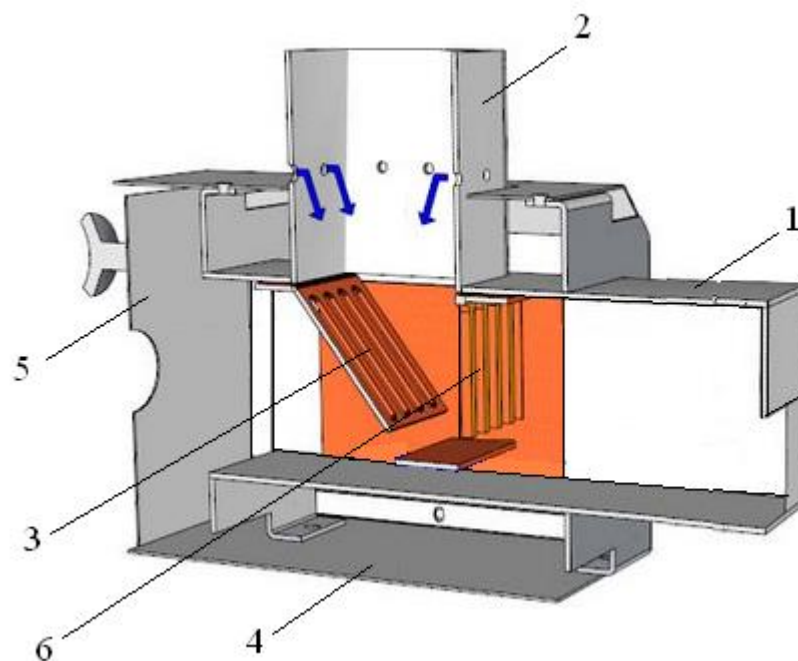


Рис. 2.1 Схема пелетного пальника Пеллетрон-15 [47]

Пелетний пальник входить до складу опалювального пристрою (котла), що обладнаний димовою трубою. Запуск пальника відбувається за умов його попереднього розігріву від стороннього джерела теплоти для створення необхідного перепаду тиску в димовій трубі та забезпечення умов подачі повітря в пальник і вільного виходу димових газів (тобто створення тяги в трубі). Принцип роботи пелетного пальника видно з рисунку 2.2.

Пелетне паливо (1) подається в пальник з бункера під дією сили тяжіння. Після подачі палива з бункера в камеру горіння, воно прогрівається в камері горіння стороннім джерелом теплоти (наприклад газовим пальником) до його

займання. Первинне повітря (2) надходить в камеру згоряння через отвори в каналі подачі палива. Воно надходить в пальник за рахунок розрядження, що створюється тягою в димовій трубі. Вторинне повітря (3) надходить через отвір в дверцятах. Це повітря нагрівається за рахунок контакту зі стінками камери згоряння. Цей повторний потік сприяє також охолодженню кожуха пальника.

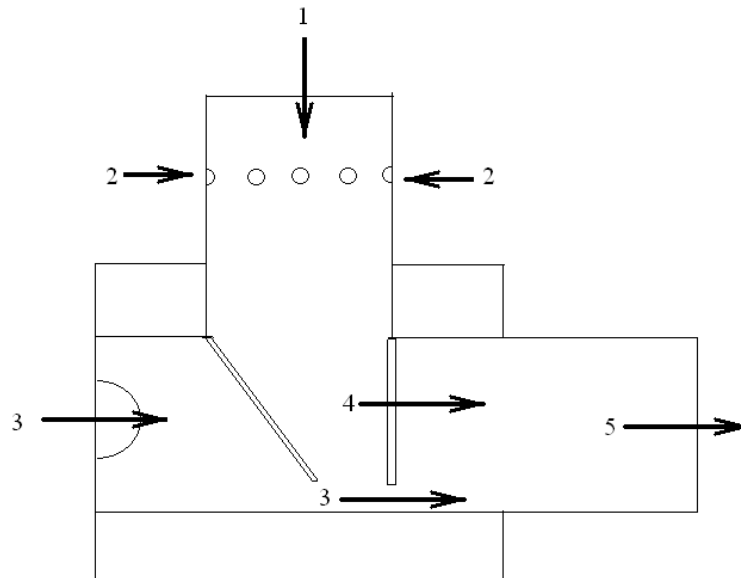


Рис. 2.2 Схема руху палива та газів в пелетному пальнику.

Горіння пелет відбувається в камері згоряння. В процесі розігріву та розкладання пелетного біопалива відбувається вихід летючих речовин. З цих за камерою горіння формується потік горючих газів (4), який на виході з пристрою змішується з вторинним повітрям (3) і утворює факел (5). Факел полум'я через вихідний перетин корпусу (1) надходить до об'єму твердопаливного котла, до якого приєднується пальник.

В камері згоряння відбувається також спалювання вуглецевого залишку, що формується з пелетного палива після виходу летючих газів. Тверді продукти згорання видаляються з нижньої частини камери горіння напором повітря, підхоплюються потоком вторинного повітря і видаляються з пристрою в зольник котла.

Потік первинного повітря (2), що проходить через вентиляційні отвори в каналі подачі, не дозволяє гарячим газам підніматися вгору по цьому каналу. Це запобігає руйнуванню пелет і забезпечує стабільну подачу гранул.

Пальник працює з моменту старту до закінчення запасу палива в бункері, або через примусове переривання подачі палива в камеру горіння.

Схему приєднання пелетного пальника до бункера та до котла наведено на рисунку 2.3.



Рис. 2.3 Схема приєднання пелетного пальника до бункера та до котла [48]: 1 – пелетний пальник; 2 – бункер з пелетами; 3 – котел, 4 – труба котла.

Запас палива зберігається в герметичному бункері ємністю 17 або 34 кг пелет. Герметична кришка обмежує доступ повітря в бункер і оберігає пелет від загоряння [47].

На бункері так само змонтований автомат відключення, який перекриває подачу пелет в пальник у разі відключення електроенергії або нагріву теплоносія до температури понад 85 градусів С. В камері згоряння формується факел полум'я, який через вихідний перетин корпусу (1) надходить до об'єму твердопаливного котла, до якого приєднується пальник.

Для визначення закономірностей процесу спалювання пелет в пальнику та теплотехнічних характеристик роботи побутового котла з пелетним

пальником виконуються дослідження температурного режиму об'єму котла при різних режимах роботи пальника. Вимірювання температури здійснюється за допомогою восьми ХА термопар з відкритим спаєм, що розташовуються на різних висотах та різних відстанях від вихідного перетину пальника [48]. Схема розташування термопар наведено на рисунку 2.4. Координати точок, в яких розташовуються спаї ХА термопар, представлені в таблиці 2.1.

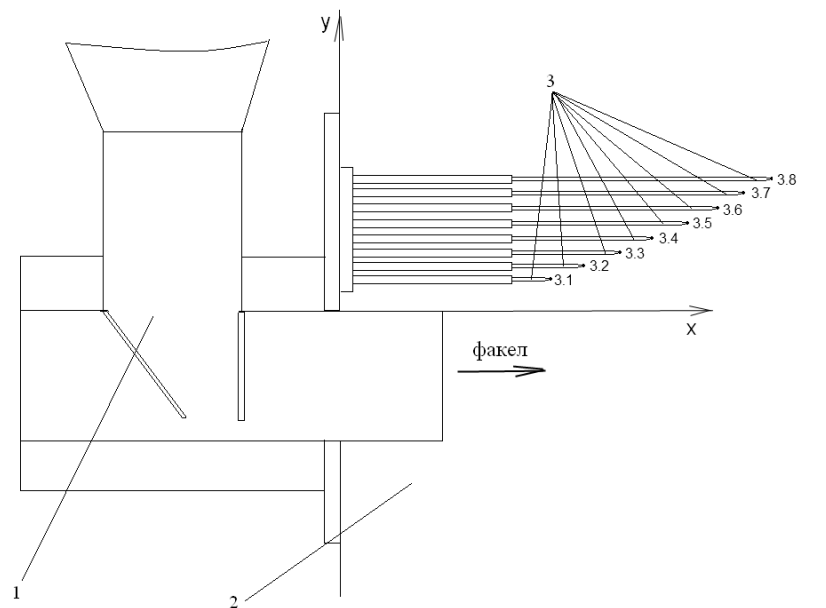


Рис. 2.4 Схема вимірювання температури в об'ємі котла: 1 – пелетний пальник; 2 – об'єм котла; 3 – термопари.

Таблиця 2.1. Координати спаїв термопар

№	x, см	y, см
3.1	10,8	2,1
3.2	12,8	2,7
3.3	14,2	3,3
3.4	16,6	3,8
3.5	18,7	4,7
3.6	22,4	5,2
3.7	25,2	5,7
3.8	31,4	6,2

Для визначення впливу характеристик біопалива на ефективність роботи побутового котла з пелетним пальником дослідження проводяться з деревними та солом'яними пелетами.

2.1.2. Температурний режим в котлі з пелетним пальником при спалюванні пелет з соломи

Запалення пелетного пальника здійснюється наступним чином. В бункер завантажуються пелетне паливо. За допомогою пристрою для регулювання витрати пелетного палива спочатку встановлюється режим мінімальної подачі. В цьому режимі в камеру згоряння подається невелика кількість палива для того, щоб швидше воно розгорілось від стороннього джерела полум'я. Для ініціації процесу горіння, який починається з термічного розкладання біомаси та виходу летючих газів, необхідно, щоб паливо розігрілось від вихідної температури до температури початку піролізу. Крім того, певний обсяг теплоти необхідно витратити на процес видалення вологи з палива. Тому на стадії розпалювання пелетів в пальнику їх кількість повинна бути такою, щоб теплоти від стороннього джерела полум'я вистачило для проходження початкових стадій до початку самостійного горіння. Але водночас кількість палива повинна бути достатньою для того, щоб загальної кількості летючих газів, що з нього виділяється, вистачало для підтримання температурного режиму самостійного горіння.

Перед початком розпалювання пелет необхідно створити достатній рівень тяги в димарі, до якого приєднано котел. З цією метою перед початком підпалу пелет необхідно від стороннього джерела теплоти підігріти повітря в тракті видалення димових газів. Це здійснюється шляхом введення полум'я від стороннього джерела у спеціальне вікно в трубі, через які повинні виходити димові гази. Коли рівень тяги в димарі стає достатнім, пелети в камері згоряння підпалюються стороннім джерелом полум'я. Для цього використовується портативний газовий пальник. Його вихідний отвір вводиться в камеру згоряння. Підпал триває доти, доки над пелетами не

з'явиться полум'я, яке не згасає після того, як стороннє джерело полум'я видаляється.

Зміну у часі температурного стану об'єму котла при спалюванні солом'яних пелет представлено на рисунку 2.5. В бункер було завантажено невелику кількість палива масою 0,4 кг. На кривій 1 відображено показання термопарі №3.1 (рисунок 2.5). Крива 2 відповідає показанням термопарі №3.6, а крива 3 – показанням термопарі №3.8. Термопара №3.8 розташована на найбільшій відстані (31,4 см) від зрізу пальника і найближче до протилежної відносно пальника стінки котла.

Дані на рисунку 2.5 відносяться до часового періоду від початку розпалювання пелет в пальнику до виходу котла на квазістаціонарний режим експлуатації. В період до 93 с пелети, що знаходяться в пальнику, розпалюються від стороннього джерела полум'я. Після початку самостійного горіння пелет в пальнику, значення температури, що фіксується зазначеними термопарами, починають стрімко зростати. Найбільший приріст температура відбувається біля стінки котла, що протилежна до пальника (що зафіксовано термопарою №3.8). Температурні показники термопар №3.1 та №3.6 також зростають, але значно повільніше. В результаті, за період від початку самостійного горіння до виходу процесу горіння на квазістаціонарний режим температура біля протилежної стінки зростає до 300...340 °С, а температура, що зафіксована термопарами №3.1 та №3.6 – лише до 100...150 °С. Це свідчить про те, що з камери згоряння пелетного пальника в об'єм котла надходить факел полум'я, максимальна температура якого спостерігається біля протилежної стінки. Тобто швидкість потоку горючих газів настільки висока, що факел «б'є» у протилежну стінку котла.

На стадії розпалювання пелет регулятор витрат палива з бункера встановлено на режим мінімальної подачі для того, щоб енергії, яка виділяється при горінні летючих, вистачало для підвищення температури пелетного палива до рівня, необхідного для самостійного горіння. Після

виходу процесу горіння на квазістаціонарний режим при мінімальній подачі з бункера можливе довільне регулювання процесом подачі палива з бункера.

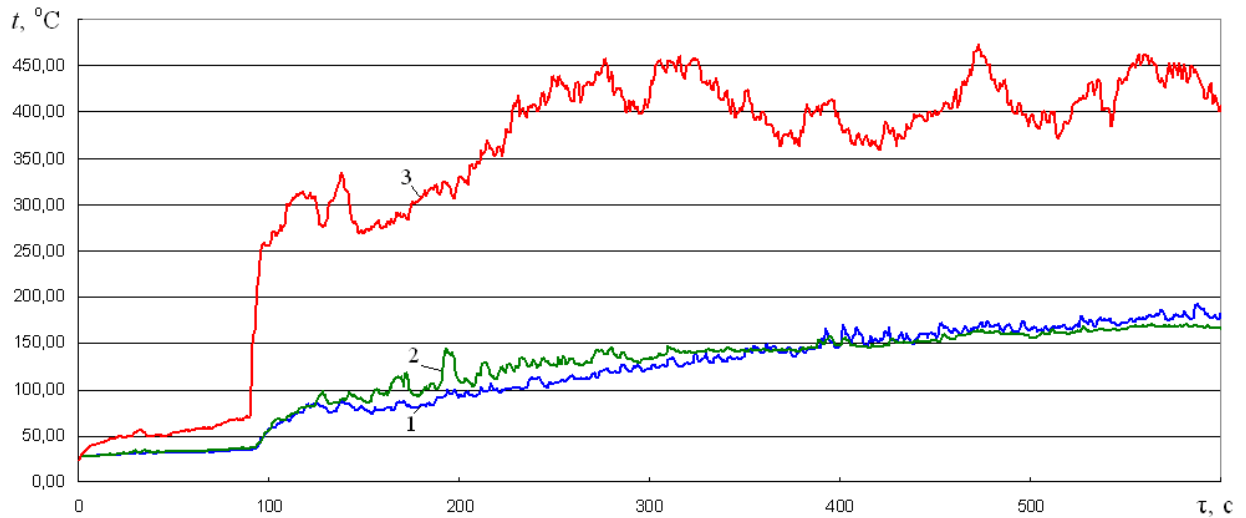


Рис. 2.5 Зміна у часі температурного стану котла на стадії його розпалу та квазістаціонарного режиму горіння солом'яних пелет: 1 — показання термопар 3.1; 2 — 3.6; 3 — 3.8.

На 130 секунді, коли паливо вже горить самостійно, в ручному режимі збільшується витрата палива, що надходить з бункера до пальника. Пелети під дією сили тяжіння самостійно висипаються з бункера в пальник. Маса палива в камері згорання збільшується. Як видно з рисунку 2.5, це супроводжується деяким тимчасовим зниженням температури факела. Нове паливо, що надійшло з бункера, має температуру повітряного середовища в приміщенні. Для його горіння необхідно підняти його температуру до рівня початку виходу летючих. Оскільки всередині пальника залишилося паливо, що ще горить, а внутрішні поверхні камери достатньо розігріті, для підняття температури «свіжого» палива, що надійшло з бункера, до рівня початку самостійного горіння, необхідно відносно небагато часу. Тому з 145 секунди починається постійне зростання температури факела. З цього моменту часу подача палива з бункера здійснюється в режимі максимальної витрати. Підйом температури факела, що фіксується термопарою 3.8, до максимального рівня 455 °C

завершується на 276 секунд. Далі настає режим горіння в квазістаціонарному режимі при максимальній витраті палива з бункера.

На рисунку 2.6 представлено фотографію вхідного перетину камери згоряння при відкритих дверцятах в період часу, що відповідає квазістаціонарному режиму горіння. За перфорованою решіткою, через яку ззовні надходить повітря, формується факел полум'я, який з камери згоряння через вихідний отвір пальника надходить до котла.



Рис. 2.6 Горіння пелетного палива після виходу пальника на квазістаціонарний режим.

Режим горіння з максимальною подачею палива з бункера протікає з 276 с до 584 с. Показання термопар, що встановлені в просторі котла, свідчить про те, що горіння пелет в пальнику протікає у змінному температурному режимі. Це видно з показання термопарі №3.8, яка розташована на ділянці, на яку спрямовано факел полум'я. З характеру зміни показань термопарі 3.8 (крива 3 на рисунку 2.16) видно, що з періодичністю 80...90 с температура факела полум'я зростає до 450...470 °С та знижується до 370 °С. Такий нестабільний режим горіння пов'язаний з періодичним поповненням камери

згоряння новими порціями палива з бункера. При завантаженні нової порції палива температура факела спадає. Далі, коли воно прогрівається і досягає необхідної для виходу летючих газів температури, починається підйом температури факела до моменту подачі наступної порції палива. Описаний нестабільний режим горіння пов'язаний також з неоднорідним складом паливних пелетів та зміною рівня тяги в димарі. Треба зазначити, що витрата повітря – не регульована. Його рух зумовлено природною конвекцією. Змінювати витрату повітря можливо лише шляхом відкривання дверцят пальника, або приєднанням вентилятора до його вхідного отвору.

Як також видно з рисунку 2.5 (криві 1 та 2), значення температур, які фіксуються термопарами 3.2. та 3.6, в цей період часу неухильно зростають. До моменту часу 346 с показання термопар 3.1 вищі, ніж показання термопар 3.6. Далі показання термопар 3.1 стають нижчими, ніж показання термопар 3.6. В момент часу 600 с від початку розпалювання пелет значення температури в точці 3.1 складає 183 °С, а температури в точці 3.6 відповідно 166 °С. В цій області котла температури суттєво нижчі, ніж на тій ділянці, куди спрямовано факел. Розподіли температури по ширині котла на тій висоті, де встановлено термопари, для моментів часу 200 та 600 секунд наведено на рисунку 2.7.

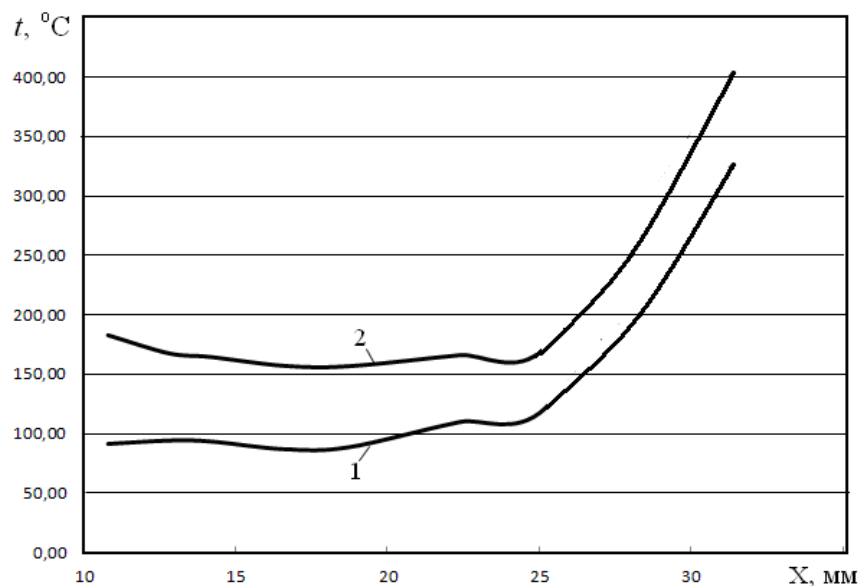


Рис. 2.7. Розподіл температури по ширині котла: 1 – $\tau=200$ с; 2 – $\tau=600$ с.

Паливо в бункері загальною масою 0,4 кг практично закінчилося до 573 секунди. Далі в пальнику догоряє паливо, що в ньому залишилося. З цього моменту температура факела (показання термопарі 3.8) починає поступово знижуватися (рисунок 2.8). Знижуються також температури, що фіксуються термопарами 3.1 та 3.6, але їх зниження протікає значно повільніше, ніж температури, що фіксуються термопарою 3.8. Найбільш стрімке зменшення температури в точці 3.8 відбувається протягом періоду 576...720 с, за який температура в цій точці зменшується з 452 °С до 275 °С. За цей період температура в точці 3.1 знижується з 192 °С до 168 °С. На цей час горіння пелет в пальнику практично припиняється. Темп падіння температури в точці 3.8 стає повільним. В момент часу 1100 с температура в цій точці знижується до 225 °С, а в точках 3.1 та 3.6. – до 152 °С та 115 °С відповідно.

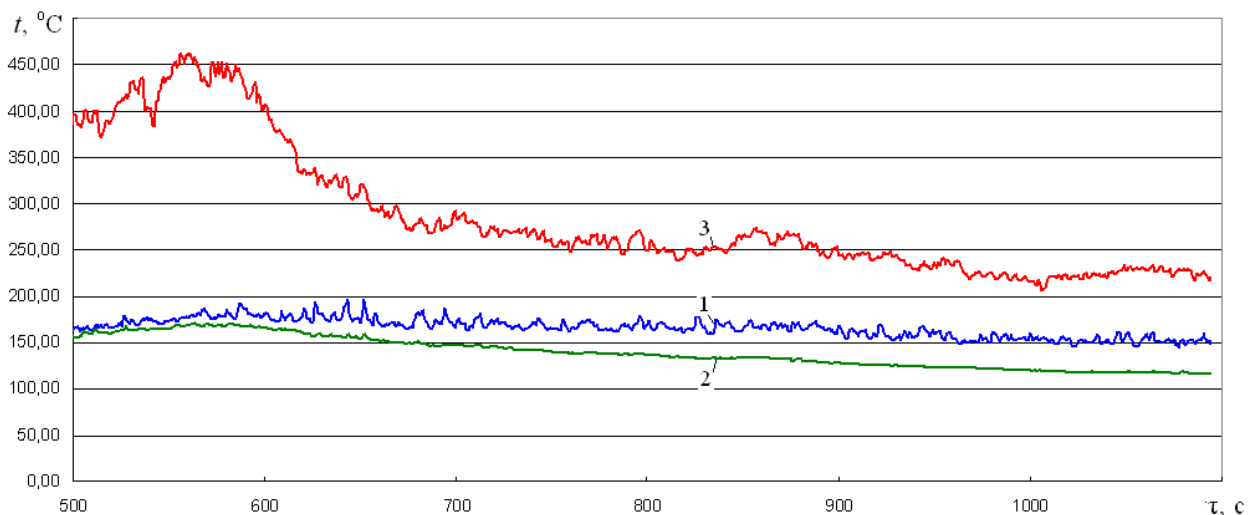


Рис. 2.8 Зміна у часі температурного режиму котла на стадії завершення горіння солом'яних пелет: 1 – показання термопарі 3.1; 2 – 3.6; 3 – 3.8

Після остаточного охолодження котла, в камері згоряння залишаються конгломерати золи, які утворилися після її розплавлення та подальшого спікання в процесі охолодження.

Головний висновок з наведених результатів полягає в тому, що температура у факелі полум'я при горінні солом'яних пелет не перевищує 470 °С. Горіння відбувається повільно. Після закінчення горіння, в камері пальника лишаються конгломерати з золи, що спеклася. Також частково

зашлакованими виявляються щілини перфорованої решітки (3) та рухомого дроселя (6) (рисунок 2.1). Через це рух повітря через камеру згоряння ускладнюється та уповільнюється.

Наступна серія експериментальних досліджень стосується спалювання у пелетному пальнику пелет з деревини. Їх діаметр складає 6 мм. На рисунку 2.9 наведено відповідну залежність від часу температурного стану в котлі на початковій стадії процесу спалювання пелет з деревини після розпалу палля від стороннього джерела (на рисунку ця стадія не наведена). Відлік часу на рисунку відповідає початку стабільної роботи пальника після його виходу на квазістаціонарний режим при мінімальній витраті палива.

В період роботи пальника з початку до 800 с режим подачі палива – мінімальний. В цьому режимі температуру у факелі, яка фіксується термопарою 3.8, змінюється в діапазоні 300 °С..350 °С. Після 650 секунди температура в точці 3.8. зменшується до 250 °С. Показання термопар 3.1 та 3.6 на протязі перших 800 секунд змінюються у межах 150 °С ...200 °С.

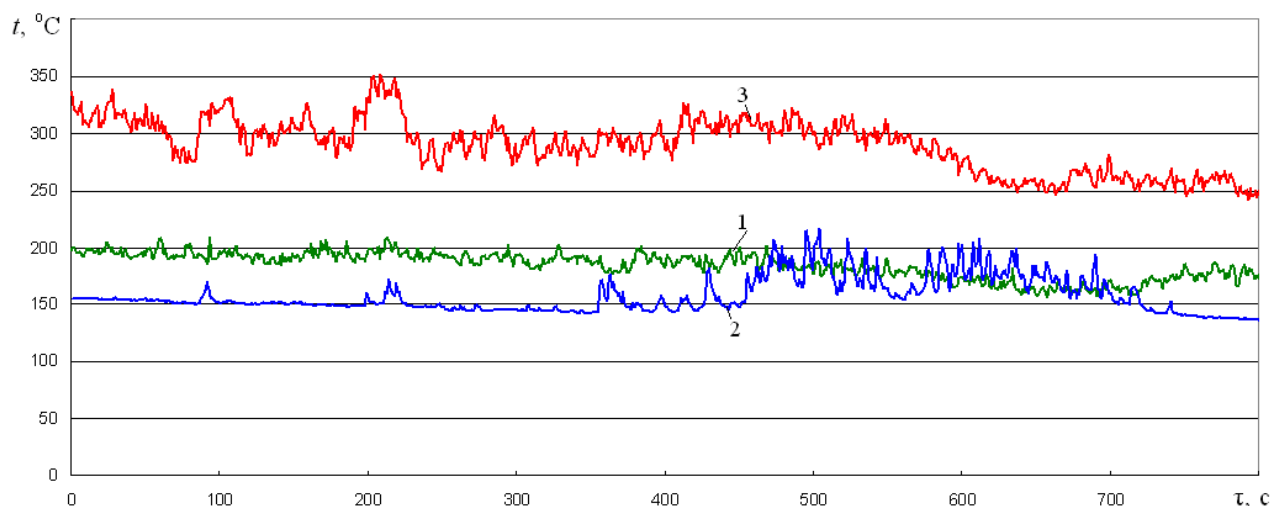


Рис. 2.9 Зміна у часі температурного стану котла на стадії квазістаціонарного режиму горіння пелет з деревини при мінімальній подачі палива : 1 – показання термопар 3.1; 2 – 3.6; 3 – 3.8

Після 800 секунди було переведено режим подачі з бункера пелетного палива з деревини на максимум. Температура в точці, де встановлено термопару 3.8, почала стрімко зростати (рисунок 2.10). На 880 секунду її

значення вже складало 680 °С. Значення температури в точках, де розташовані термопари 3.2. та 3.6 також почали зростати, але суттєво повільніше. За зазначений період вони збільшилися лише до 180 °С ...200 °С.

В даному режимі палиник працював до 1675 с. Температура в точці 3.8 коливалася в межах 500 °С ...600 °С. Іноді її значення досягали 700 °С. Мінімальні значення відповідали моментам часу при яких здійснювалася подача палива з бункера, а максимальні – періодам найбільш інтенсивного виходу та горіння летючих газів. При цьому показання термопар 3.2. та 3.6 монотонно збільшувалися. Значення температур в цих точках досягли 240 °С ...270 °С.

Для інтенсифікації процесу горіння з 1680 секунди в камеру згорання через бокові дверцята було організовано подачу підігрітого повітря з тепловентилятора. Температура в точці 3.8. при цьому почала стрімко зростати і досягла значення 800 °С. Після припинення подачі додаткового повітря з тепловентилятора температура в точці 3.8 знову знизилася до 600 °С...700 °С. Зміна температури в точці 3.8 має періодичний характер. Спостерігаються періоди підвищення та зниження температури в цій точці. Періоди складають 70 с...90 с. Ця періодичність зміни температури пов'язана з подачею нових холодних порцій палива з бункера, що викликає зниження температури факела. Після цього температура в точці 3.8. знову зростає до 700 °С ...740 °С.

Режим процесу горіння в цей період відображено на рисунку 2.12. Як видно з цього рисунку, в точках 3.2. та 3.6 температури в цей період були відносно стабільними 250 °С ...280 °С.

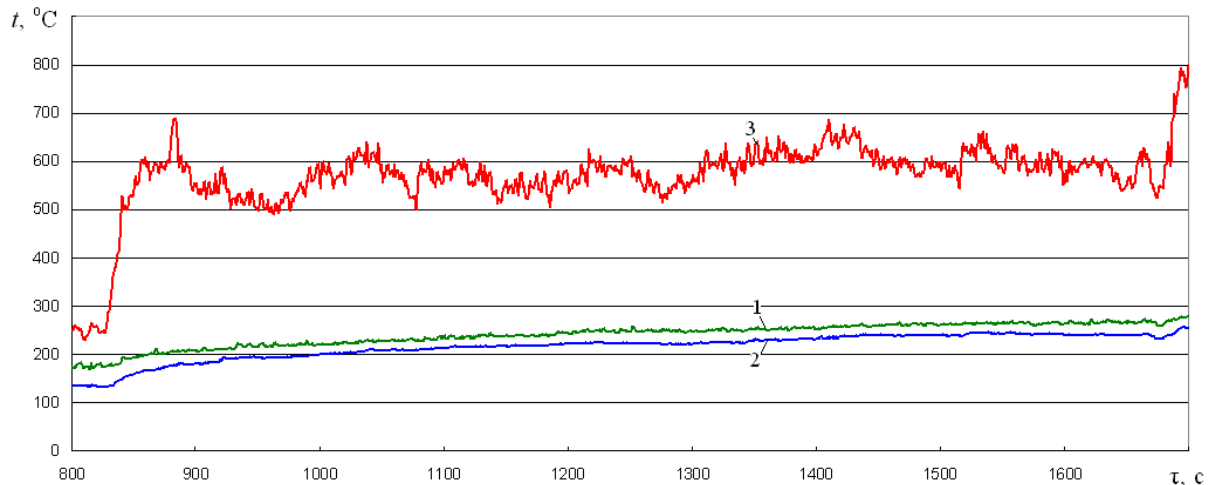


Рис. 2.10 Зміна у часі температурного стану котла на стадії квазістаціонарного режиму горіння пелет з деревини при максимальній подачі палива з бункера: 1 – показання термопар 3.1; 2 – 3.6; 3 – 3.8

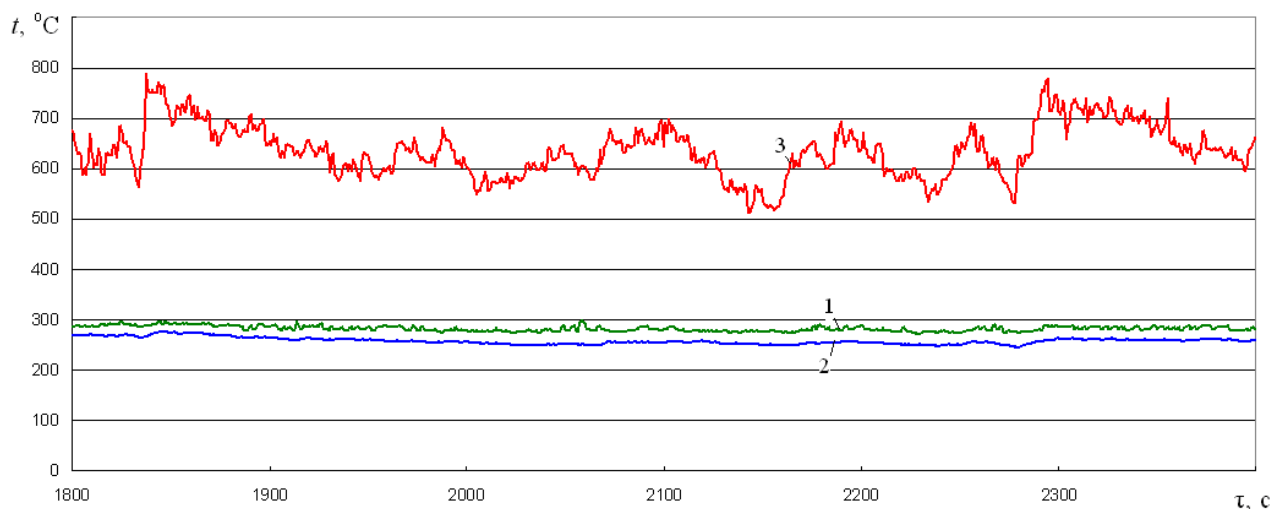


Рис. 2.11 Зміна у часі температурного стану котла на стадії квазістаціонарного режиму горіння пелет з деревини при максимальній подачі палива з бункера після припинення подачі додаткового нагрітого повітря з тепловентилятора: 1 – показання термопар 3.1; 2 – 3.6; 3 – 3.8

В момент часу 2443 с подачу палива з бункера було перекрито. В пальнику ще лишалася достатня маса палива, завдяки якій певний час продовжувався режим інтенсивного горіння. Внаслідок того, що холодне

пальне з бункера більш не потрапляє в пальник, в період від 2443 с до 2561с температура в камері згоряння та в факелі зростає і досягає в точці 3.8 максимального значення 900 °С (рисунок 2.12). Значення температури в точках 3.1 та 3.6 також досягають максимальних значень 300 °С.

До моменту часу 2561 с пелети в камері пальника практично всі згорають. Вихід летючих газів припиняється. Температура в точці 3.8 починає швидко спадати. (рисунок 2.12). До моменту часу 2655 с (тобто за 94 с) температура в цій точці спадає з 900 °С до 290 °С. Це пояснюється тим, що тепловиділення в камері згоряння практично припиняється, а повітряна тяга в розігрітому димарі ще лишається. В пальник надходить холодне зовнішнє повітря, яке охолоджує камеру згоряння та котел.

Температури в точках 3.1 та 3.6. також починають спадати, але значно повільніше. В момент часу 2820 с значення температур в цих точках зрівнюється з температурою в точці 3.8, яка складає 160 °С. Далі температури в цих трьох точках починають зменшуватися майже в однаковому темпі. При цьому температура в точці 3.8 стає навіть дещо нижчою, ніж в точках 3.1 та 3.6 (рисунок 2.12).

Після остаточного охолодження пальника та котла в камері пальника практично не лишається золи, що суттєво відрізняється від випадку спалювання пелет з соломи. Зола, яка має структуру легкого попелу, виноситься з камери згоряння під час горіння пелет і осідає в збірнику золи, що розміщується в нижній частині котла.

Наступна серія експериментальних досліджень присвячена також режиму роботи пелетного пальника при спалюванні в ньому пелет з деревини. Але на відміну від режиму їх спалювання, що розглядався вище, на початку процесу горіння застосовується режим максимальної подачі палива, а далі здійснюється перехід на режим мінімальної подачі.

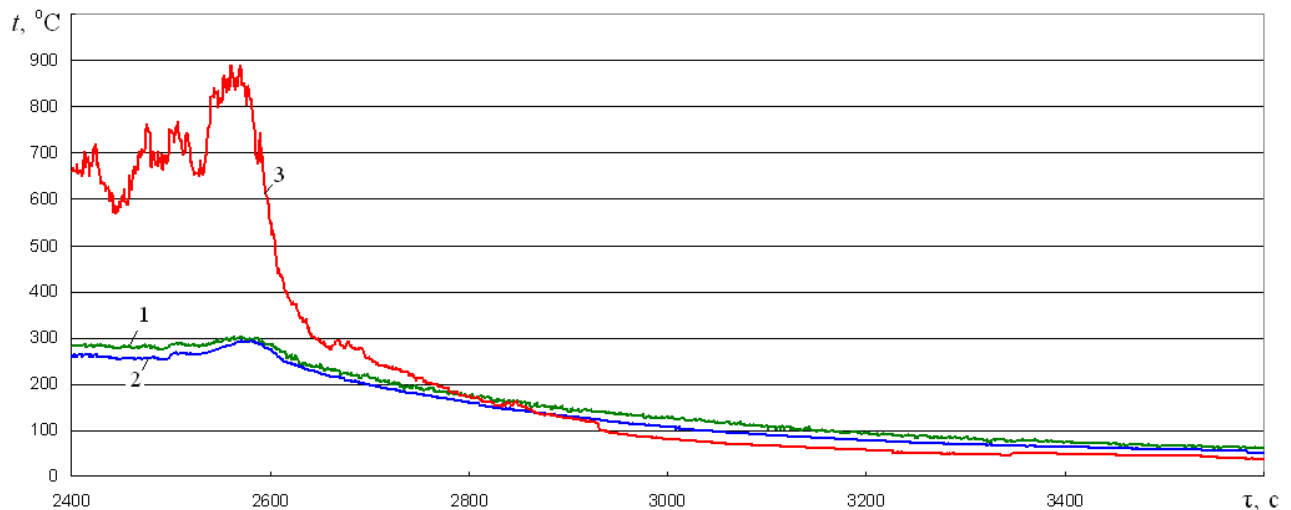


Рис. 2.12 Зміна у часі температурного режиму в котлі на стадії завершення горіння пелет з деревини: 1 – показання термопарі 3.1; 2 – 3.6; 3 – 3.8.

Температурний стан пальника, що на початковій стадії працює в режимі максимальної витрати палива, відображено на рисунку 2.13. На цьому рисунку крива 1 відповідає термопарі 3.1, крива 2 – термопарі 3.4, а крива 3 – термопарі 3.8. Як видно з рисунку, за часовий період до 1000 с температура в точці, де встановлено термопару 3.8, змінюється в періодичному режимі, який викликаний періодичністю подачі холодного палива з бункера в камеру згоряння. Температура в цій точці змінюється від 500 °С до 800 °С, тобто амплітуда коливання температури в цій точці досягає 300 °С. Періодичність коливань – 60...90 с. Температури в точках котла, де встановлено термопарі 3.2. та 3.4, повільно і майже монотонно зростають від 215 °С (точка 3.4)...240 °С (точка 3.1) до 280 °С (точка 3.4)...304 °С (точка 3.1).

В момент часу 1015 с пальник переводиться на режим мінімальної подачі палива. Температура в точці 3.8, яка відповідає області, куди спрямовано факел полум'я з пальника, стрімко зменшується до 380 °С (рисунок 2.14). Температури в точках 3.1 та 3.4 також зменшуються до 250 °С (точка 3.4)...280 °С (точка 3.1). Температура в точці 3.1 залишається на 20 °С ...30 °С вище, ніж в точці (точка 3.4). Зменшення температур в точках 3.1 та

3.4 не таке суттєве, як в точці 3.8. До моменту часу 2240 с температури в точках 3.1 та 3.4 знизилися до 206 °С та 173 °С відповідно.

В такому режимі пальник працював до моменту часу 2246 с. Потім режим подачі палива з бункера знову було переведено на максимум, що викликало зростання температури факела до 655 °С (точка 3.8). В точках 3.1 та 3.4 температура підвищилася до 267 °С та 241 °С відповідно. Надалі температура в точці 3.8 коливалася в межах 500 °С ...655 °С.

В момент часу 2572 с було в автоматичному режимі припинено подачу палива з бункера. В цей момент отвір в бункері, через який паливо з бункера потрапляє в камеру згоряння, повністю перекривається заслінкою. Бункер таким чином повністю від'єднується від камери згоряння. Припиняється подача холодного палива і в камері згоряння на деякий незначний час суттєво інтенсифікується процес горіння. Це видно з поведінки кривої 3 на рисунку 2.15, що відображає температуру в точці 3.8 простору котла, куди спрямовано факел. В момент часу 2594 с температура в цій точці досягає максимального значення 788 °С, після чого ця температура починає швидко знижуватися. До 2647 с температура в цій точці зменшується до 303 °С (за 53 секунди). Далі зниження температури стає менш інтенсивним. Температури в точках 3.1 та 3.4 також починають зменшуватися. В момент часу 2748 с температури в точках 3.1, 3.4 та 3.8 зрівнюються (188 °С). Потім температура в точці 3.8 стає нижчою, ніж в точках 3.2. та 3.4.

2.2 Розроблення експериментальної установки малої потужності для спалювання рослинних пелет

2.2.1 Опис експериментальної установки для спалювання агропелет

Для спалювання агропелет була розроблена та впроваджена експериментальна установка твердопаливного котла з пелетним пальником

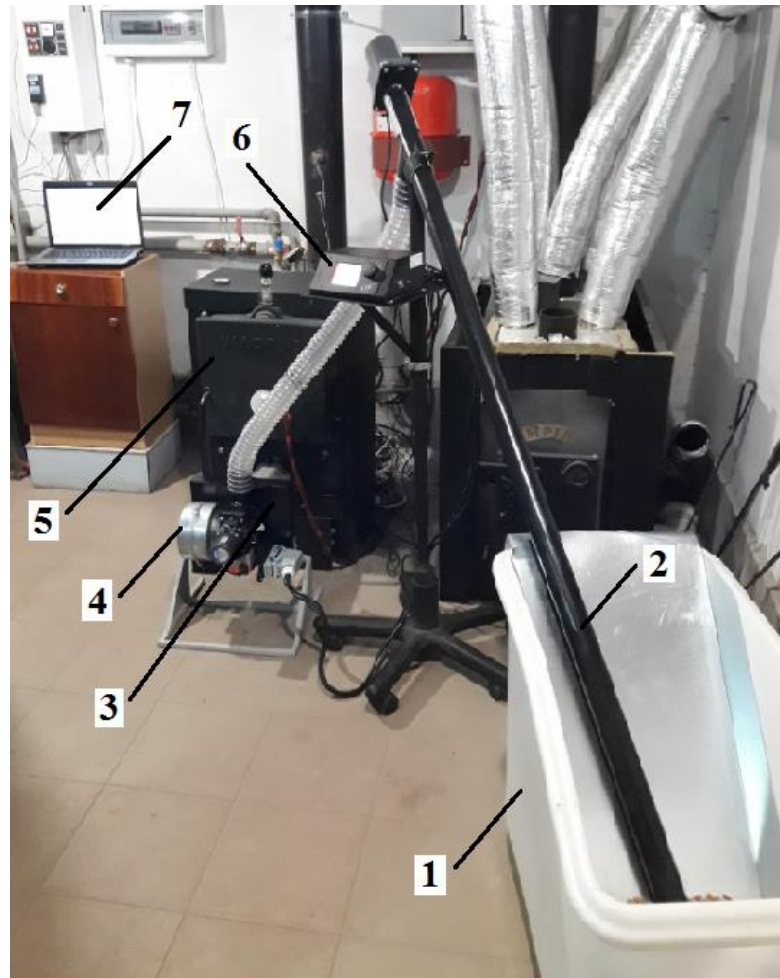
для опалення будинку пасивного типу ІТТФ НАН України (м. Київ, вул. Булаховського, 2) [50].

На рисунку 2.13 показано фото пальника, а на рисунку 2.14 – фото розробленої експериментальної установки для спалювання рослинних пелет.

Експериментальна установка працює наступним чином. Із бункера завантаження 1, в якому знаходяться пелети, за допомогою шнека транспортування 2 біопаливо подається в пелетний пальник 3. В пелетному пальнику 3 за допомогою внутрішнього шнеку біопаливо транспортується в камеру спалювання. В результаті цього на виході з камери виходить стійкий потужний факел полум'я в твердопаливному котлі 5. Для інтенсифікації процесу розпалу та горіння, а також для гасіння використовується вентилятор 4. Блок керування 6 призначений для автоматичної та безпечної роботи котла. Всі дані, отримані під час експерименту, вимірюються за допомогою вимірювальної установки, до якої входить ноутбук 7 та гребінка з 8 ХА термопарами, яка розташована всередині котла.



Рис. 2.13 Фото пальника



1 – бункер завантаження; 2 – зовнішній шнек транспортування біопалива; 3 – пелетний пальник; 4 – вентилятор; 5 – твердопаливний котел; 6 – блок керування котлом; 7 – ноутбук для архівування отриманих експериментальних даних

Рис. 2.14 Експериментальна установка для спалювання рослинних пелет

Особливу увагу необхідно приділити вентилятору, оскільки він суттєво впливає на процес спалювання пелет. Вентилятор складається з литого під тиском алюмінієвого корпусу. У ньому встановлено двигун-колесо з загнутими вперед лопатками на базі двигуна із зовнішнім ротором. На корпусі закріплена захисна решітка, клемна коробка з пусковим конденсатором і кабелем з роз'ємом для підключення до мережі живлення. На рисунку 2.15 показано графік продуктивності, а в таблиці 2.2 – технічні дані вентилятора.

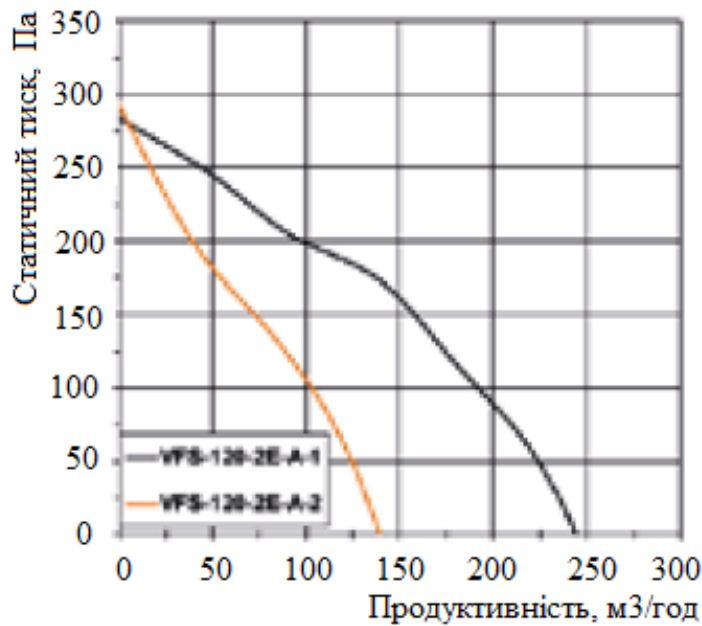


Рис. 2.15 Графік продуктивності вентилятора

Таблиця 2.2 Технічні дані вентилятора

Напруга	230 В, 50 Гц
Потужність	77 Вт
Струм	0,37 А
Клас ізоляції	В
Продуктивність максимальна	244 м ³ /год.
Повний тиск	283 Па
Швидкість	2680 об/хв.
Температура навколишнього середовища	-25 +50 °С
Ступінь захисту	IP44
Конденсатор	2μF
Маса	2,3 кг

Експериментальна установка має в своєму складі котел Viadrus номінальною потужністю 25 кВт. Спалювання біомаси відбувається безпосередньо в топці котла, а теплота, що виділяється, передається теплоносію частково в самій топці, а частково – від продуктів згоряння, які в топці завдяки своєму руху контактують з конвективними поверхнями теплообміну (конвективний теплообмінник) та поступово віддають теплоту теплоносію. Пальниковий пристрій являє собою автоматизований елемент пальникової системи з автоматичною подачею палива, регулюванням подачі

окисника (повітря) та рухомим елементом – скребком на поді – для періодичного очищення від золи колосникової платформи.

Швидкість подачі палива встановлюється в ручному режимі, щоб отримати безперервну роботу з малою кількістю горючих елементів в залишку.

Важливим також є регулювання витрати повітря, що надходить до камери згорання ззовні, вентилятором з частотним регулюванням продуктивності. На початковій стадії камера згорання ще не розігріта до достатньої температури. Тому збільшена витрата повітря при розпалюванні, що надходить в камеру згорання, може суттєво уповільнити процес горіння. Подача повітря контролюється за допомогою вентилятора з регульованою частотою обертів, встановленого всередині пальника. Котел має герметичну камеру згорання, і вважається, що фільтраційне проникнення повітря є незначним.

Витрата пелет, що надходять з бункера до камери згорання, регулюється електронним блоком управління твердопаливного котла. За його допомогою також можна налаштувати ряд параметрів роботи котла: потужність роботи котла, максимальна і мінімальна продуктивність вентилятора, час роботи внутрішнього шнека у пальнику при підведенні пелет у високотемпературну зону, параметри очищення рухомим скребком поду пальника.

2.2.2 Електронний блок управління твердопаливним котлом

Блок управління (контролер), призначений для управління котлом центрального опалення (ЦО), оснащеного пальником з черв'ячним живильником. Контролер керує: плавною зміною потужності вентилятора, включенням насоса ЦО і гарячого водопостачання (ГВП), а також широко використовується в пелетних пальниках з автоматичним розпалом. Завдяки можливості підключення, через інтерфейс RS 485, модулів розширення, також управляє клапаном змішувача трьох- або чотирьоходового клапана і додатковим змішувальним насосом. Крім того, до контролера може бути

підключений модуль GSM, який використовується для контролю роботи котла через мобільну мережу. Також, контролер може працювати з кімнатним термостатом, що працює на основі контакту зімкнутий/ розімкнутий.

Контролер керує двома незалежними процесами:

а) регуляція температури: алгоритм PID встановлює необхідну потужність котла для досягнення потрібної температури, завдяки чому відсутні різкі зміни температури в димоході, а також в камері згоряння. Процес горіння може бути постійним, без перерв, з потужністю від 5% (стан підтримки вогню) до 100% (максимальна потужність котла);

б) регулювання процесу спалювання: автоматичне дозування палива. Програмне забезпечення автоматично змінює кількість палива.

До контролера входить: датчик температури ЦО; датчик температури ГВП; датчик температури димових газів; кабель підключення пальника; кабель живлення; запобіжник 10А.

На рисунку 2.16 показана схема підключення контролера.

Переваги використання блоку управління твердопаливним котлом:

– значна економія палива, оскільки є можливість керування інтенсивністю горіння;

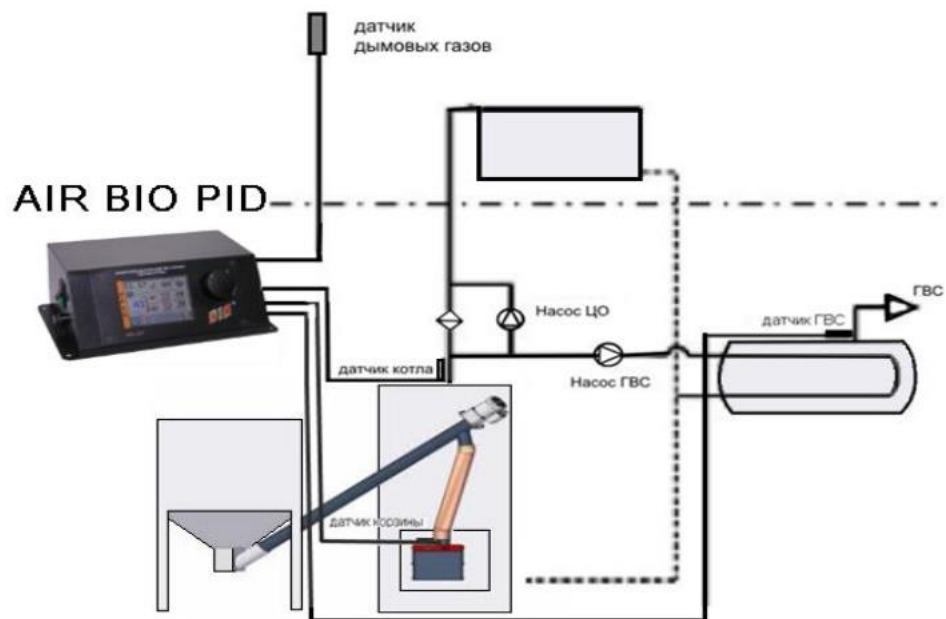


Рис. 2.16 Схема підключення контролера

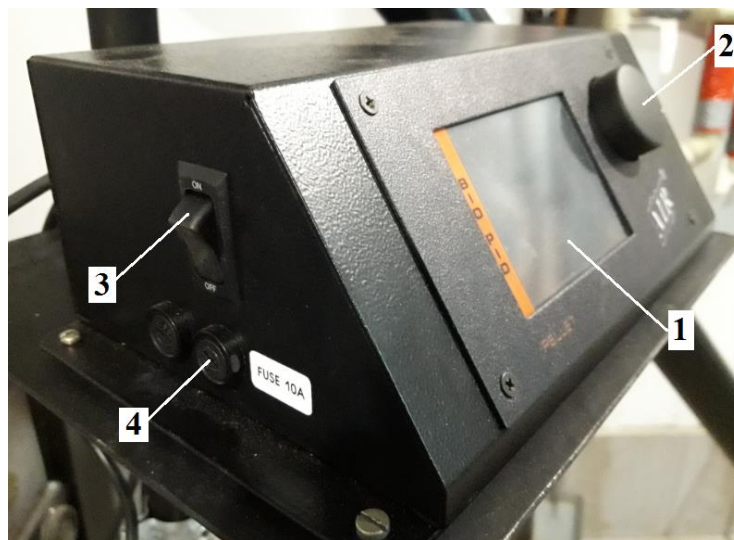
- можливість регулювання температури ГВП;
- можливість управління температурою ЦО;
- можливість адаптувати роботу котла під різні види палива;
- безпеку. При закипанні теплоносія ЦО або обриві датчика температури спрацьовує система безпеки;
- екологія: низький рівень пилу і газів шкідливих для навколишнього середовища, низька температура димових газів.

Контролер складається з наступних складових частин та елементів управління (рисунок 2.17).

Екран блоку управління – відображає режим роботи котла. При вході в «МЕНЮ» відображає пункти меню і режими налаштування відповідних пунктів.

Багатофункціональний елемент управління (енкодер) – поєднує в собі кнопку вибору пункту меню і поворотний механізм, для переміщення по меню. Поворот ручки на головному екрані – зміна налаштувань температури ЦО. Натискання на енкодер відкриває меню контролера.

Мережевий вимикач – призначений для вмикання/вимикання блоку.



1 – екран блоку управління; 2 – багатофункціональний елемент управління (енкодер); 3 – мережевий вимикач; 4 – роз'єм запобіжника

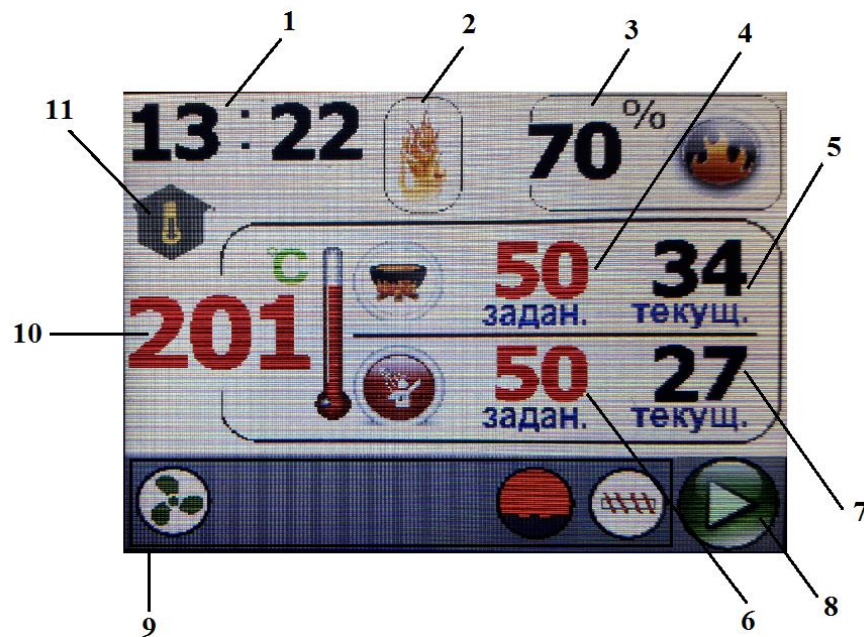
Рис. 2.17 Зовнішній вигляд регулятора

Роз'єм запобіжника – в роз'єм встановлений плавкий запобіжник. Роз'єм виведений на зовнішню панель пристрою для полегшення заміни запобіжника.

Запуск пальника. Контролер може автоматично управляти процесом розпалу й зупинкою пеллетного пальника. Щоб почати процес розпалювання необхідно зайти в головне меню, вибрати пункт меню «Розпалювання», і натиснути на енкодер. Зображення повернеться на головний екран, а у верхній частині екрану з'явиться значок режиму роботи розпалювання. Коли пальник розгорівся, контролер переходить в робочий режим і починає виконувати завдання по набору температури.

Контролер виконує 3 спроби розпалювання, якщо вони будуть невдалі виведеться повідомлення про помилку на екран, що супроводжується звуковим сигналом.

Вигляд та описання головного екрану контролера. На дисплеї відображається поточний стан роботи котла (рисунок 2.18)



1 – поточний час; 2 – режим роботи котла; 3 – поточна потужність котла; 4 – задана температура котла; 5 – поточна температура котла; 6 – задана температура ГВП; 7 – поточна температура ГВП; 8 – стан котла; 9 – індикація роботи; 10 – поточна температура димових газів; 11 – пріоритет роботи котла

Рис. 2.18 Головний екран контролера

Гасіння. Функція призначена для зупинки роботи пальника. Цей процес займає різну кількість часу. Щоб почати процес гасіння необхідно натиснути енкодер, відкриється головне меню, поворотом енкодера вибрати пункт меню «Гасіння», і натиснути енкодер. Зображення повернеться на головний екран, у верхній частині екрану виведеться значок режиму роботи гасіння.

В таблиці 2.3 показані технічні характеристики експериментальної установки.

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики установки

Електричні характеристики:	
Живлення	~ 230В АС/50Гц
Споживана потужність	4,5Вт
Максимальна потужність вентилятора	200Вт
Максимальна потужність колосника	200Вт
Максимальна потужність живильника	300Вт
Максимальна потужність запальника	1000Вт
Максимальна потужність насоса ЦО	1000Вт
Максимальна потужність насоса ГВП	1000Вт
Вимірювання:	
Точність вимірювання температури води на виході	2 °С
Точність вимірювання інших температур	2 °С
Діапазон вимірювання температури	0-95 °С
Діапазон вимірювання температури димових газів	0-400 °С
Інші параметри:	
Робоча температура	10-50 °С
Вологість	40-90% без утворення конденсату
Діапазон регулювання температури котла	40 - 90 °С
Діапазон регулювання температури ГВП	40-80 °С
Захист від замерзання, при температурі нижче 5 °С вмикається циркуляційний насос ЦО	

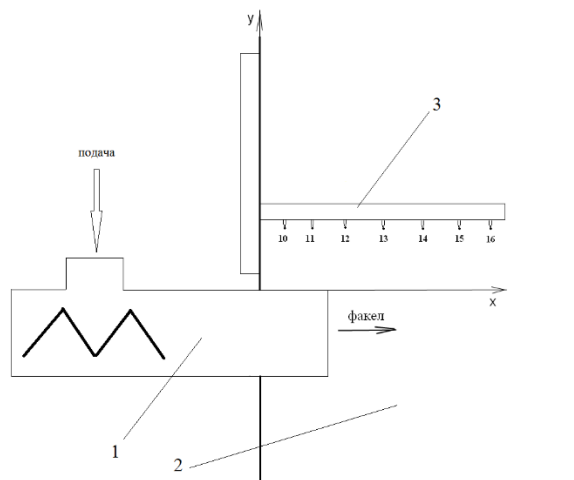
2.2.3 Система вимірювання температурного режиму котла з пелетним пальником

Для визначення закономірностей процесу спалювання пелет в пальнику та теплотехнічних характеристик роботи твердопаливного котла з пелетним пальником виконуються дослідження температурного режиму в об'ємі котла при роботі пальника. З цією метою розроблено систему вимірювання на основі гребінки з ХА термопарами (рисунок 2.19). Гребінка містить 7 ХА термопар.



Рис. 2.19 Гребінка термопар, що встановлена безпосередньо над факелом для вимірювання температури в просторі котла

Гребінка з термопарами безпосередньо встановлена над факелом так, як це показано на рисунку 2.20.



1 – пелетний пальник; 2 – об'єм котла; 3 – гребінка термопар

Рис. 2.20 Схема вимірювання температури в об'ємі котла

2.3 Дослідження процесу горіння пелет різного походження

Для запуску пелетного пальника в бункер спочатку завантажуються пелети. Витрати палива, що надходить з бункера в камеру згорання, регулюються за допомогою електронного блоку управління котлом. За допомогою блоку управління проводиться налаштування й інших параметрів роботи котла, а саме:

- температура котла;
- час роботи внутрішнього шнека;
- час роботи і пауза шнекового живильника;
- максимальна і мінімальна потужність роботи вентилятора;
- потужність роботи котла;
- параметри очищення пальника та ін.

Після всіх необхідних налаштувань відбувається запуск пальника, шляхом вибору пункту меню “Розпалювання” в контролері. Коли пальник розгорівся, контролер переходить в робочий режим і починає виконувати завдання по досягненні заданої температури.

Важливим також є регулювання витрати повітря, що надходить в камеру згорання ззовні завдяки вентилятору. На початковій стадії камера згорання ще не розігріта до достатнього температурного рівня. Тому велика витрата зовнішнього холодного повітря, що надходить в камеру згорання, може суттєво уповільнити процес горіння. Витрата палива регулюється спеціальним пристроєм, що знаходиться між бункером та камерою згорання.

До конструкції пальника входить також датчик температури, за показниками якого автоматично відключається подача палива з бункера до камери згорання у випадку суттєвого перевищення температури відносно заданих показників. Така ситуація може виникнути при раптовому зменшенні тяги в димарі і зменшенні подачі зовнішнього повітря в камеру згорання.

При проведенні експериментальних досліджень використовувались зразки рослинних пелет, які показано на рисунку 2.21.



а)



б)



в)



г)



д)



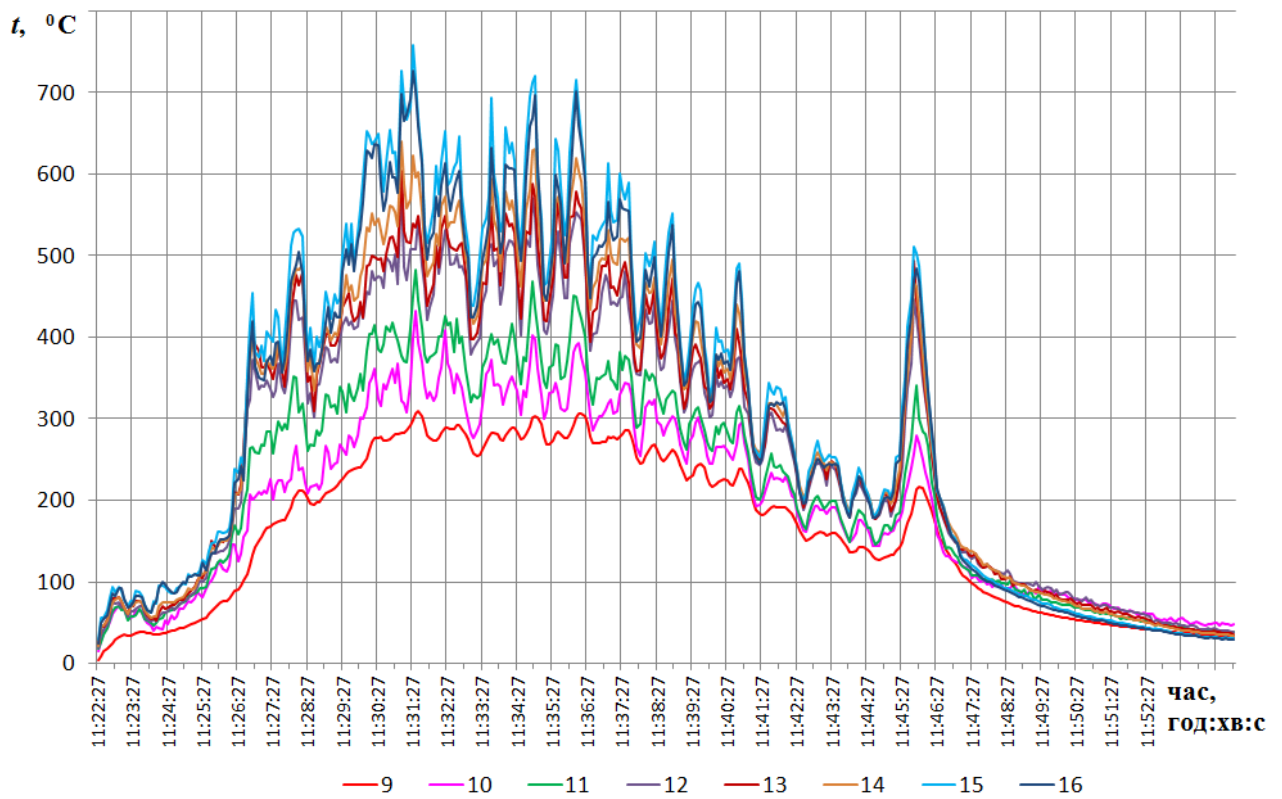
е)

а) солома ячменю; б) солома пшениці; в) гранули із качанів кукурудзи
г) пелети з соломи ріпаку; д) пелети з бурякового жому; е) деревні пелети

Рис. 2.21 Фото експериментальних зразків рослинних пелет

На рисунках 2.22 – 2.31 показано зміну у часі температурного стану об'єму котла на стадії розпалу пелет рослинного походження, їх горіння та затухання.

На рисунку 2.22 показано зміну у часі температурного стану об'єму котла при спалюванні деревних пелет. Як видно з графіку перші 4 хв. відбувалось розпалювання пелет від запальника. Після цього періоду пелети починають горіти самостійно. Значення температури в об'ємі котла починають поступово зростати. Найбільший приріст температури відбувається біля стінки котла, що протилежна до пальника. На момент часу 9 хв. від початку експерименту температура біля протилежної стінки котла зростає до 750 °С (рисунок 2.22, термопара №16). В цю ділянку надходить факел полум'я, тобто швидкість потоку горючих газів настільки висока, що факел «б'є» у протилежну стінку котла. Температурні показники термопар №10-№15 також зростають, але повільніше.



9 – температура димових газів; 10-16 – температури гребінки термопар, що розташована над факелом

Рис. 2.22 Зміна у часі показників термопар при спалюванні деревних пелет

З 9-ї по 15-у хв. експерименту відбувається стабільний процес горіння деревних пелет. Це визначається за температурою димових газів, яка

становить 270-300 °С, що характеризує нормальний процес горіння. Протягом цього часу відбувалась автоматична періодична подача пелет з бункера за запрограмованим алгоритмом. При цьому температури термопар №12-№16 коливались в межах 400-700 °С, термопарі №11 – в межах 330-450 °С, термопарі №10 – в межах 280-420 °С. Коливання температури відбуваються внаслідок періодичного вигорання порції біопалива в пальнику і надходження нової порції пелет з бункера.

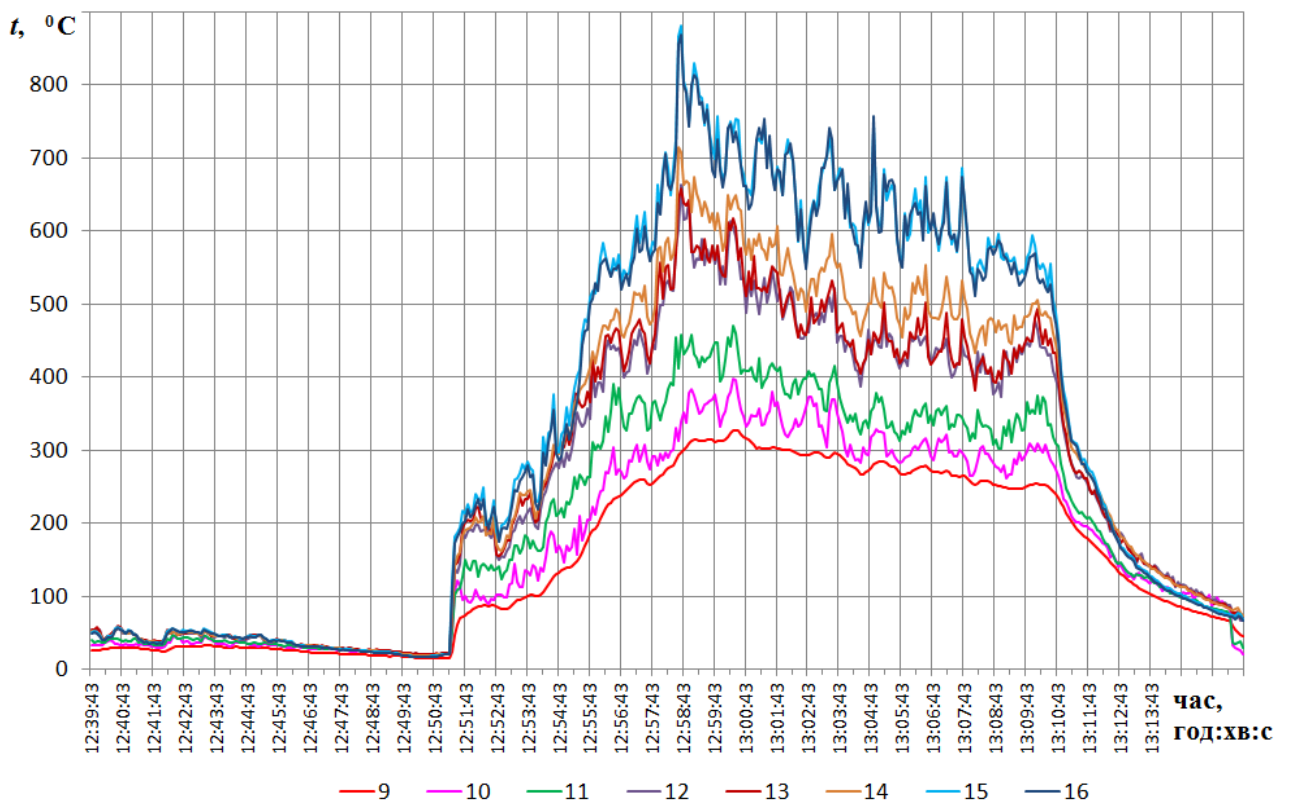
Після 15 хв. від початку експерименту відбувається гасіння пальника, шляхом вибору пункту меню “Гасіння” в контролері. Як видно з графіка (рисунок 2.22) починається поступове зниження температур в камері котла. Пік температур при гасінні (на графіку показано з 11 год. 45 хв. 27 с. по 11 год. 46 хв. 27) пояснюється тим, що в цей момент ввімкнувся вентилятор для прискорення догорання залишків палива. Після закінчення процесу гасіння на контролері відображається відповідний символ. Залишків після спалювання деревних пелет майже немає.

На рисунку 2.23 показано зміну у часі температурного стану об’єму котла при спалюванні соломи ячменю. Протягом перших 11,5 хв., як видно з графіку, відбувалось розпалювання пелет від запальника. Після розпалювання пелети починають горіти, а значення температур в об’ємі котла починають поступово зростати. Найбільший приріст температури відбувається біля стінки котла, що протилежна до пальника, як і в попередньому експерименті. На момент часу 19 хв. від початку експерименту температура біля протилежної стінки котла зростає до 870 °С (рисунок 2.23, термопара №16).

З 19-ї по 31-у хв. експерименту відбувається стабільний процес горіння солом’яних пелет. Середня температура димових газів при цьому становить 270°С. Протягом цього часу відбувалась автоматична періодична подача пелет з бункера за запрограмованим алгоритмом. При цьому температури термопар №12-№16 коливались в межах 390-750 °С, термопарі №11 – в межах 300-460 °С, термопарі №10 – в межах 280-400 °С. Коливання температури

відбуваються внаслідок періодичного вигорання порції біопалива в пальнику і надходження нової порції пелет з бункера.

Після 31 хв. від початку експерименту відбувається гасіння пальника, шляхом вибору пункту меню “Гасіння” в контролері. Як видно з графіка (рисунок 2.23) починається поступове зниження температур в камері котла і димових газів. Після закінчення процесу гасіння на контролері відображається відповідний символ.



9 – температура димових газів; 10-16 – температури гребінки термопар, що розташована над факелом

Рис 2.23 Зміна у часі показників термопар при спалюванні соломи ячменю

На рисунку 2.24 показано залишки після спалювання пелет з соломи ячменю.

На рисунку 2.25 показано зміну у часі температурного стану об'єму котла при спалюванні пелет з соломи пшениці. В цьому випадку розпалювання пелет від запальника відбулось дуже швидко, протягом 2 хв., як видно з графіку. Після розпалювання пелети починають горіти, а значення температур

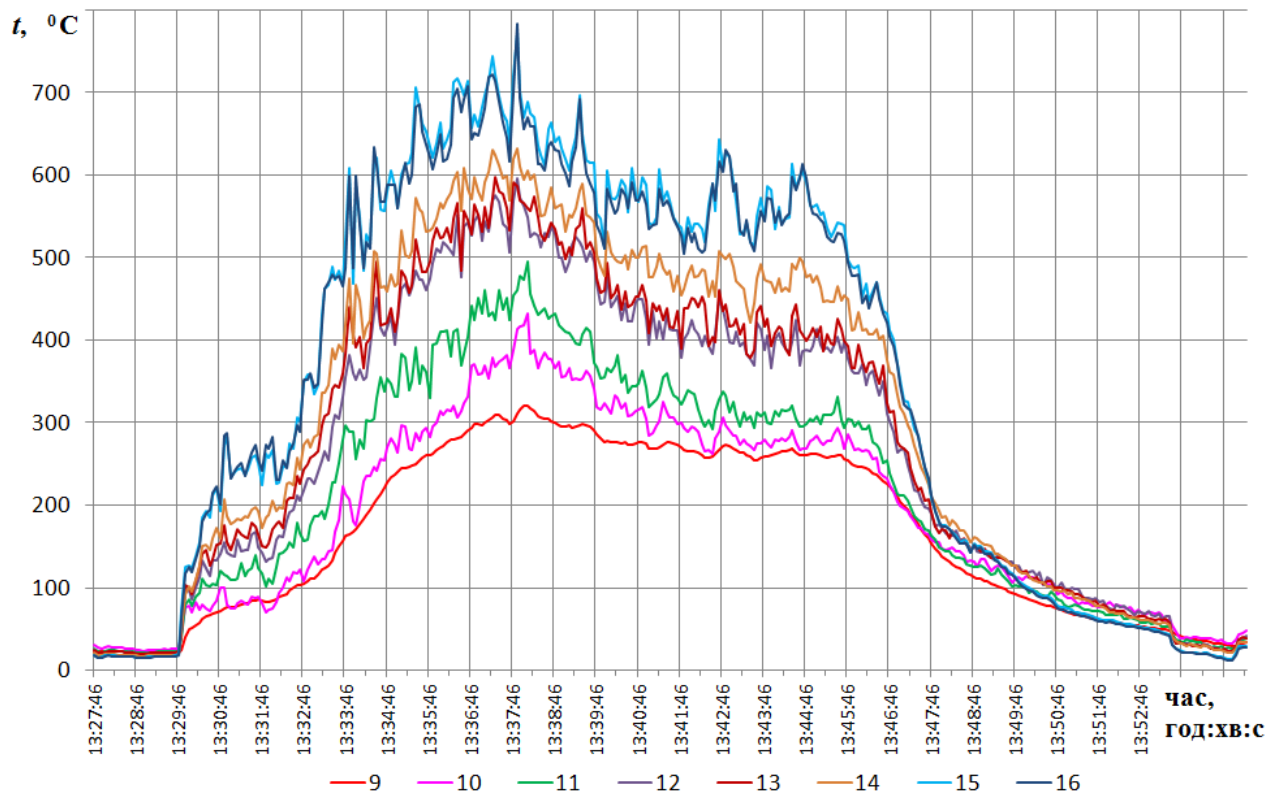
в об'ємі котла починають поступово зростати. Найбільший приріст температури відбувається біля стінки котла, що протилежна до пальника. На момент часу 10 хв. від початку експерименту температура біля протилежної стінки котла зростає до 785 °С (рисунок 2.25, термопара №16).



Рис. 2.24 Фото залишків після спалювання пелет з соломи ячменю

З 10-ї по 18-у хв. експерименту відбувається стабільний процес горіння солом'яних пелет. Середня температура димових газів при цьому становить 270°С. Протягом цього часу відбувалась автоматична періодична подача пелет з бункера за запрограмованим алгоритмом. При цьому температури термопар №12-№16 коливались в межах 380-700 °С, термопари №11 – в межах 300-430 °С, термопари №10 – в межах 280-420 °С. Коливання температури відбуваються внаслідок періодичного вигорання порції біопалива в пальнику і надходження нової порції пелет з бункера.

Після 18 хв. від початку експерименту відбувається гасіння пальника, шляхом вибору пункту меню “Гасіння” в контролері. Як видно з графіка (рисунок 2.25) починається поступове зниження температур в камері котла і димових газів. Після закінчення процесу гасіння на контролері відображається відповідний символ.



9 – температура димових газів; 10-16 – температури гребінки термопар, що розташована над факелом

Рис. 2.25 Зміна у часі показників термопар при спалюванні соломи пшениці

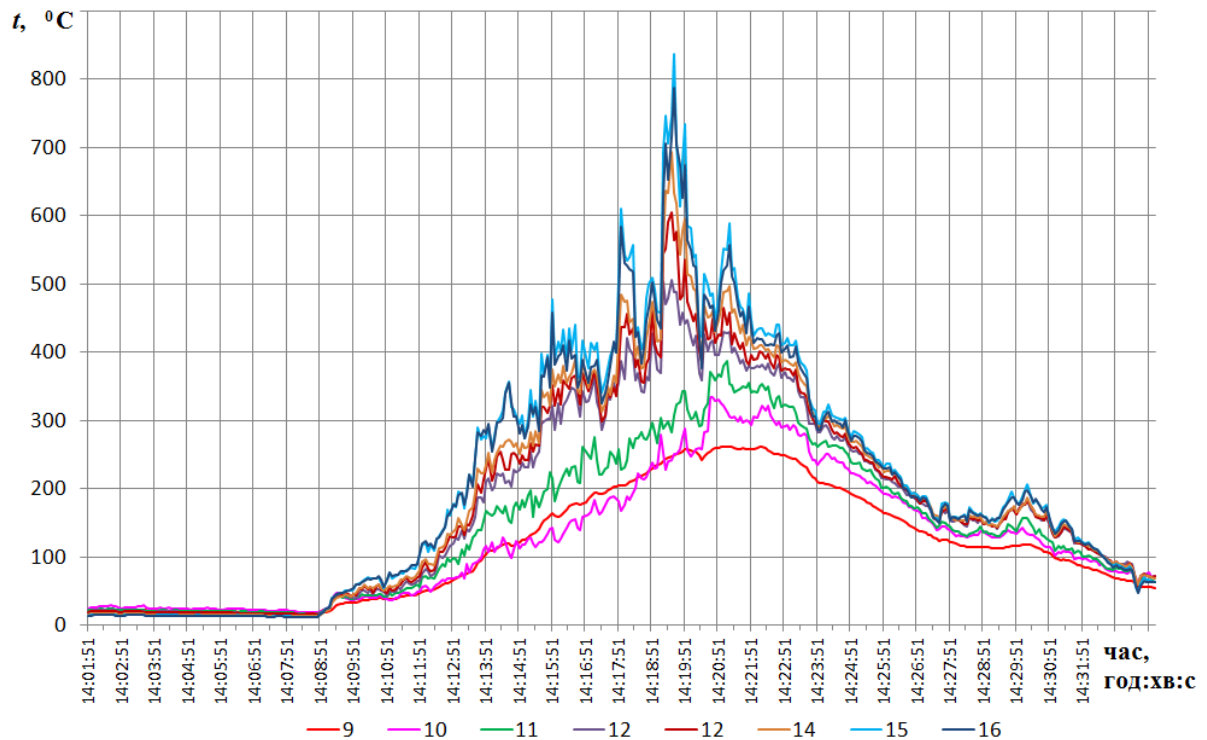
На рисунку 2.26 показано залишки після спалювання пелет з соломи пшениці.



Рис. 2.26 Фото залишків після спалювання пелет з соломи пшениці

Зміну у часі температурного стану об'єму котла при спалюванні гранул з качанів кукурудзи показано на рисунку 2.27. Розпалювання пелет від

запальника відбулось протягом 7 хв., як видно з графіку. Після розпалювання пелети починають горіти, а значення температур в об'ємі котла починають поступово зростати. Найбільший приріст температури відбувається біля стінки котла, що протилежна до пальника. На момент часу 18 хв. від початку експерименту температура біля протилежної стінки котла зростає до 840 °С (рисунок 2.27, термопара №15).



9 – температура димових газів; 10-16 – температури гребінки термопар, що розташована над факелом

Рис 2.27 Зміна у часі показників термопар при спалюванні гранул з качанів кукурудзи

З 18-ї по 22-у хв. експерименту відбувається процес горіння гранул з качанів з кукурудзи. Середня температура димових газів при цьому становить 250 °С. Протягом цього часу відбувалась автоматична періодична подача пелет з бункера за запрограмованим алгоритмом. При цьому температури термопар №12-№16 коливались в межах 300-700 °С, термопари №11 – в межах 290-390 °С, термопари №10 – в межах 250-330 °С. Коливання температури

відбуваються внаслідок періодичного вигорання порції біопалива в пальнику і надходження нової порції пелет з бункера.

Після 22 хв. від початку експерименту відбувається гасіння пальника, шляхом вибору пункту меню “Гасіння” в контролері. Як видно з графіка (рисунок 2.27) починається поступове зниження температур в камері котла і димових газів. Незначне підвищення температур при гасінні пояснюється тим, що в цей момент ввімкнувся вентилятор для прискорення догорання залишків палива. Після закінчення процесу гасіння на контролері відображається відповідний символ.

На рисунку 2.28 показано залишки після спалювання гранул з качанів кукурудзи.



Рис. 2.28 Фото залишків після спалювання гранул з качанів кукурудзи

На рисунку 2.29 показано зміну у часі температурного стану топки котла на стадії розпалу деревних пелет, їх горіння та затухання. Як видно із графіка, розпалювання деревних пелет відбувалося протягом перших 300 с. Розпалювання палива реалізовано від спеціального запальника. Після розпалювання пелети починають горіти, а значення температури в об’ємі котла починає поступово зростати. Найбільший приріст температури відбувається біля фронтальної стінки котла, що протилежна до пальника. На момент часу 2550 с від початку експерименту максимальні значення температур сягають 680 °С (рисунок 2.29, термопара №8).

З 2105 с до 2500 с експерименту відбувається стабільний процес горіння деревних пелет. Середня температура димових газів при цьому становить 260 °С. Протягом цього часу відбувалась автоматична періодична подача пелет з бункера за запрограмованим алгоритмом. При цьому температура коливалась у таких межах:

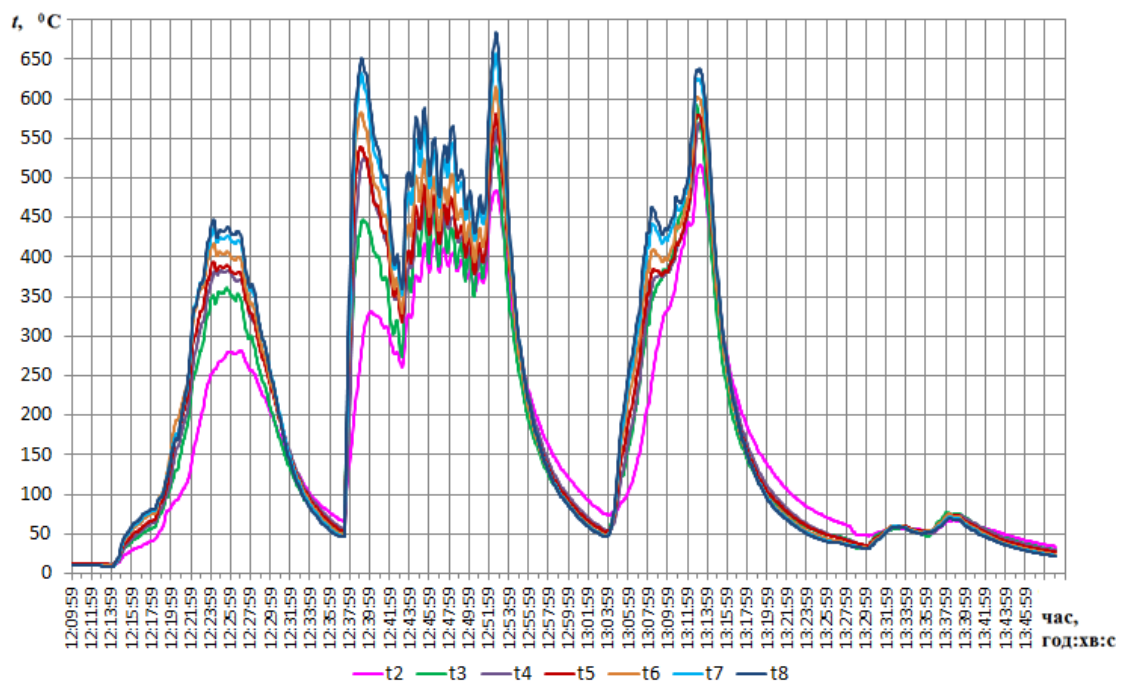
- термопари № 4-8 – 400...590 °С;
- термопари № 2-3 – 350...450 °С.

Коливання температури відбуваються внаслідок періодичного вигорання порції біопалива в пальнику і надходження нової порції пелет з бункера.

Під час проведення експерименту задавались наступні параметри роботи обладнання:

1. Для вентилятора задавались – мінімальна/максимальна потужності, %: 11/15, 15/25, 7/15, 10/20;

2. Для шнека подачі палива задавались – час роботи шнека подачі палива/пауза між порціями палива, с: 10/36, 10/30, 15/35, 20/35.

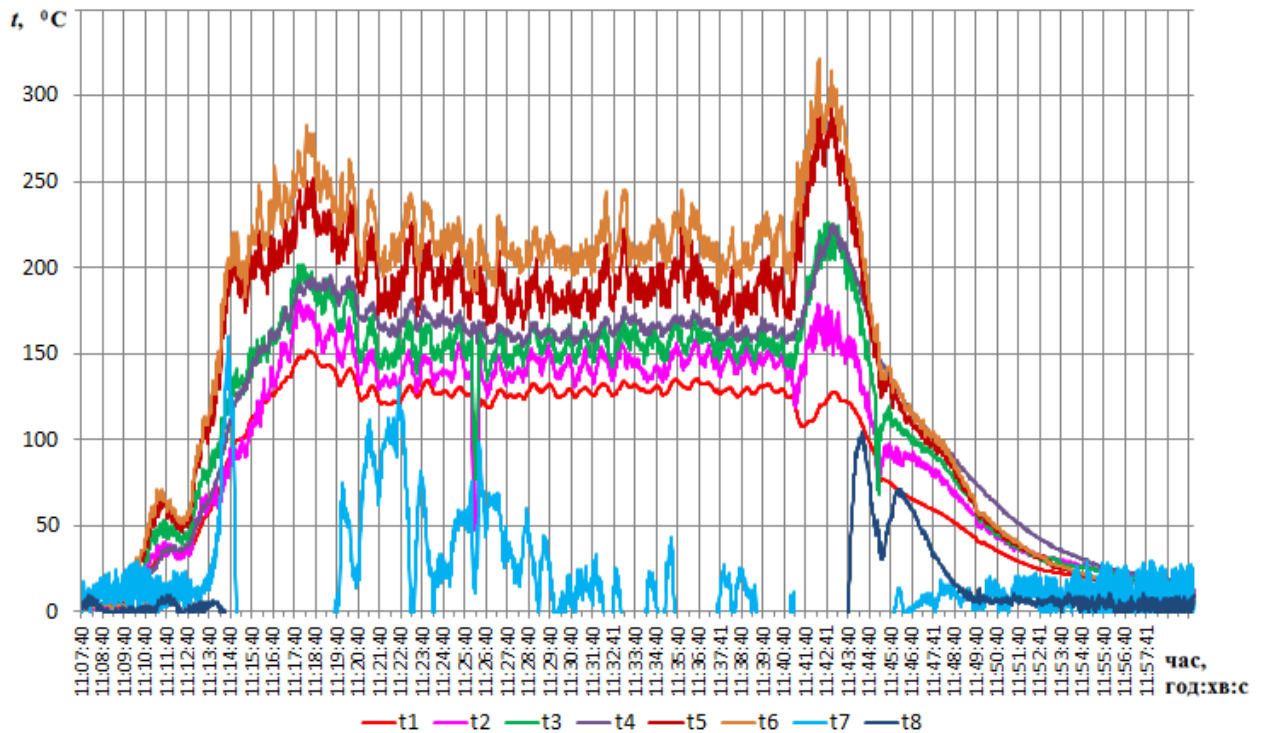


$t_2 - t_8$ – значення температур, що вимірювались термопарами №2-№8 відповідно

Рис. 2.29 Зміна у часі показників термопар при спалюванні деревних пелет

Як видно з графіка (рисунок 2.29) з 12 год. 53 хв. і з 13 год. 13 хв. відбулось різке падіння температур в просторі котла. Це пов'язано з автоматичним відключенням котла у зв'язку з перевищенням встановленої температури димових газів 300 °С (на графіку ця температура не показана) шляхом запуску контролером програми гасіння пальника. Незначне підвищення температур в кінці експерименту свідчить про ввімкнення вентилятора для прискорення догорання решток палива.

На рисунку 2.30 показано зміну у часі температурного стану топки котла на стадії розпалу пелет з соломи ріпаку, їх горіння та затухання. Протягом перших 300 с., як видно з графіку, відбувалось розпалювання пелет від запальника. Після розпалювання пелети починають горіти, а значення температур в об'ємі котла починають зростати. На момент часу 600 с. від початку експерименту і протягом наступних 1380 с. відбувається стабільний процес горіння пелет. Середня температура димових газів при цьому становить 130 °С (термопара №1). Протягом цього часу відбувалась автоматична періодична подача пелет з бункера за запрограмованим алгоритмом. При цьому температури термопар №2-№6 коливались в межах 125-250 °С. Слід зазначити, що під час проведення цього експерименту вийшли з ладу термопари №7 і №8. Коливання температури відбуваються внаслідок періодичного вигорання порції біопалива в пальнику і надходження нової порції пелет з бункера.



t_1 – температура димових газів; $t_2 - t_8$ – значення температур, що вимірювались термопарами №2-№8 відповідно

Рис. 2.30 Зміна у часі показників термопар при спалюванні пелет з соломи ріпаку

Під час проведення експерименту задавались наступні параметри роботи обладнання:

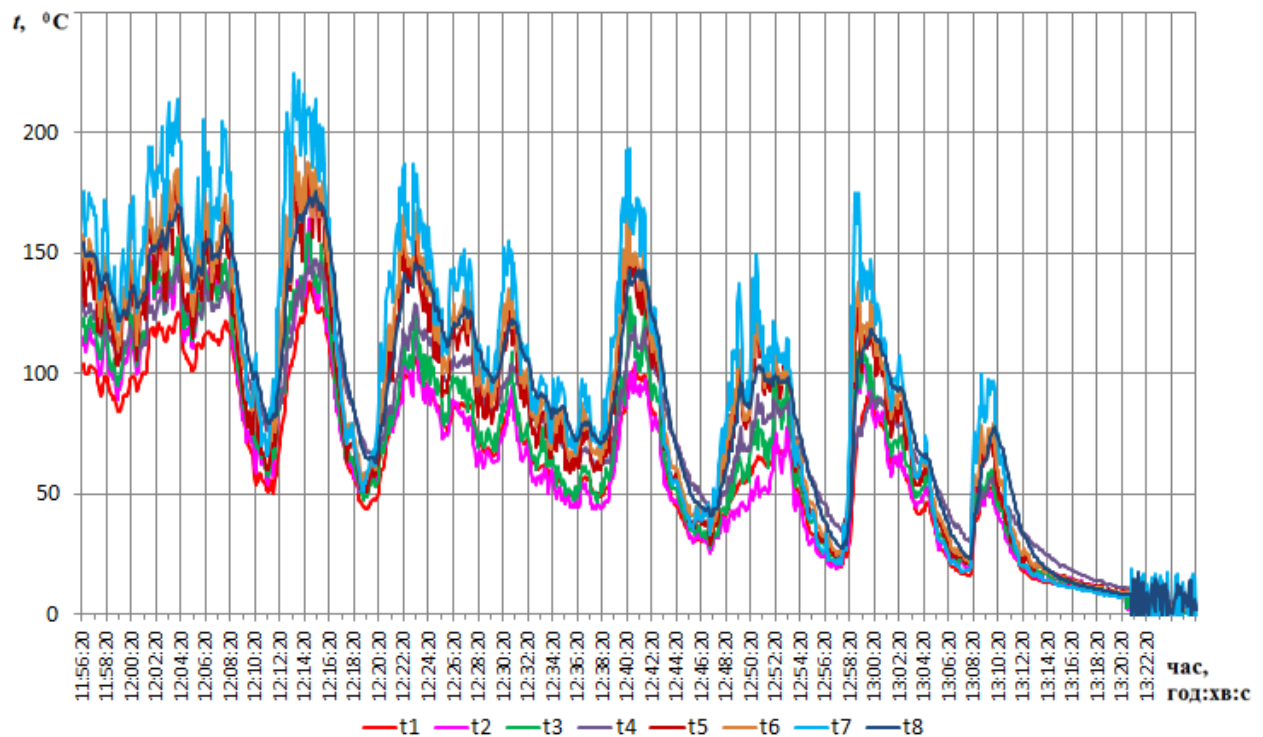
1. Для вентилятора задавались – мінімальна/максимальна потужності, %: 11/15.

2. Для шнека подачі палива задавались – час роботи шнека подачі палива/пауза між порціями палива, с: 10/30, 10/40, 10/45.

Оскільки горіння пелет з соломи ріпаку відбувалось стабільно і без проблем, то після 35 хв. від початку експерименту був обраний режим примусового гасіння пального, шляхом вибору відповідного пункту меню в контролері. Як видно з графіка (рисунок 2.30), починається поступове зниження температур в камері котла і димових газів.

В результаті цього експерименту встановлено значно менший рівень температур у порівнянні з деревним паливом. Виміряні значення знаходяться у діапазоні 125...250 °С на усталеному режимі горіння.

На рисунку 2.31 показано зміну у часі температурного стану топки котла при спалюванні пелет із бурякового жому.



t_1 – температура димових газів; $t_2 - t_8$ – значення температур, що вимірювались термопарами №2-№8 відповідно

Рис. 2.31 Зміна у часі показників термопар при спалюванні пелет із бурякового жому

Як показав експеримент, вийти на усталений режим горіння досить проблематично, а процедура розпалу та згасання чередувалась з підвищеним діапазоном коливань температур у порівнянні з попередніми експериментами. Очевидно, що при налагодженні системи паливоподачі і режимів роботи пальника потрібно враховувати теплофізичні характеристики палива, у першу чергу вологість та теплотворну здатність, а також вихід летючих горючих компонентів. У представленому вигляді досягти сталої роботи

автоматизованої системи важко, але одним із варіантів вирішення проблеми є спалювання суміші пелетного палива.

На завершення кожного експерименту було сфотографовано залишки золи палива (рисунки 2.32, 2.33, 2.34).

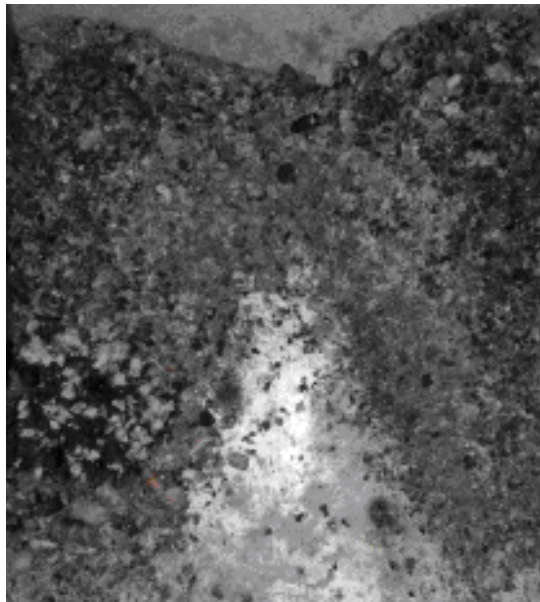


Рис. 2.32 Золовий залишок при спалюванні пелет з деревного палива



Рис. 2.33 Золовий залишок при спалюванні пелет з соломки ріпаку



Рис. 2.34 Золовий залишок при спалюванні пелет із бурякового жому

Також для порівняння результати експериментальних досліджень спалювання інших рослинних пелет можна розглянути в [51, 52].

2.4. Висновки до другого розділу

1. Вдосконалено та впроваджено експериментальну установку твердопаливного котла з пелетним пальником для спалювання рослинних пелет для опалення будинку пасивного типу ІТТФ НАН України.

2. Проведені експериментальні дослідження спалювання рослинних пелет, а саме деревних, солом'яних (ячмінь, пшениця) та гранул з качанів кукурудзи, соломи ріпаку, пелет із бурякового жому для визначення їх особливостей горіння в котлі з пелетним пальником.

2. Експериментальний пальник доведено до працездатного стану, виявлено умови його стійкої роботи з належними показниками керованості процесу, повноти вигорання палива та показників емісії забруднюючих речовин. Пальник забезпечує виділення летючих речовин та їх займанням у просторі пальника з формуванням палаючого факела у топковому просторі котла. Досягнута потужність експериментального пальника 65 кВт відповідає розрахунковій.

3. Побудовані графічні залежності зміни у часі показників термопар при спалюванні досліджуваних зразків пелет.

4. За певних розмірів частинок біопалива можуть виникнути умови, за яких температура при їх спалюванні перевищить температуру розм'якшення та розплавлення золи, що негативно впливає на подальше горіння пелет в пальнику.

5. Процес горіння пелет з деревини у цілому протікає інтенсивніше, ніж горіння пелет з соломи. Після горіння солом'яних пелет утворюватися агломерати з золи після її розплавлення та спікання, що ускладнює її спалювання у звичайному пальнику.

Показано, що більш високу температуру у факелі полум'я, що надходить з пальника у простір котла, забезпечують пелети з деревини (до 800 °С). При спалюванні пелет з соломи температура у факелі не перевищує 450 °С.

6. В поєднанні твердопаливного котла і запропонованих пальників (малої потужності – до 25 кВт) можна спалювати широкий асортимент пелет сільськогосподарського походження.

Досліджувані пальники можна ефективно використовувати для будівель котеджного типу.

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ СПАЛЮВАННЯ АГРОПЕЛЕТ

3.1 Методи математичного моделювання процесів спалювання агропелет

Спалювання біомаси вимагає спеціальної конструкції котлів. Основні вимоги до котлів і котелень на біопаливі стосуються теплової потужності котла; необхідності комплектації котельні надійним обладнанням для накопичення і подачі біомаси різної вологості, системою пожежогасіння і підготовки палива до спалювання; забезпеченості високоефективними системами очищення газових викидів із котлів від золи і дисперсних частинок до концентрацій, обумовлених проєктом оцінки впливу на навколишнє середовище; можливості періодичного (бажано автоматизованого) очищення поверхонь нагрівання котлів від золи; забезпечення повноти згорання палива; забезпечення комплексу заходів із пожежної безпеки в котельні і складі біопалива тощо [53].

Процес спалювання біомаси – один з найстаріших методів отримання теплової енергії. Однак існує ряд проблем при його практичному використанні, головною з них є досягнення глибокого вигорання палива. До технічних пристроїв, які використовуються для прямого спалювання біомаси, відносяться печі, топки та камери згорання. Біомаса може використовуватися шляхом прямого спалювання в енергетичних установках у факелі, киплячому або ущільненому шарі з подальшим отриманням теплової і електричної енергії.

Основним недоліком дрібномасштабної технології спалювання біомаси є викиди твердих частинок, коли агропелети використовуються як паливо. У дослідженні [54] проаналізували газоподібні викиди та викиди твердих частинок, що утворюються при спалюванні чистої відпрацьованої кавової гущі та змішаної з сосною тирсою (50/50 % маси) в комерційному побутовому котлі на пелетах. Стосовно викидів твердих частинок зроблено висновок, що

викиди у 3,5 рази вищі порівняно з сумішшю та в 10,3 рази порівняно з гранулами чистої соснової тирси. У роботі [55] отримані рівні викидів твердих частинок надзвичайно високі і коливаються від 966 до 2719 мг/м³ при 10% O₂ в сухих димових газах. Для порівняння, типові викиди твердих частинок при спалюванні сертифікованих та несертифікованих деревних пелет коливаються від 21,9 до 110 мг/м³ при 10% O₂ в сухих димових газах [56]. Крім більших викидів забруднюючих речовин, агропелети з високим вмістом золи та низькою температурою плавлення є ще однією проблемою. Так, в роботі [57] показано, що гранули з пшеничної соломи через високий вміст золи та низьку температуру плавлення золи непридатні для побутового застосування. Цей висновок узгоджується з дослідями авторів щодо використання гранул, які складаються з чистої пшеничної соломи [58]. Більш детальну інформацію про загальні проблеми, пов'язані з попелом, можна знайти також у роботі авторів [59]. Усі дослідження показують, що для спалювання чистої недеревної біомаси в побутових котлах з гарячою водою з низьким рівнем викидів, висока ефективність згоряння та висока надійність в експлуатації, необхідні модифікації традиційної системи спалювання біомаси. Розроблення нової/вдосконаленої системи горіння може бути прискорена за допомогою чисельних методів. Чисельні методи зазвичай використовуються для дослідження різних шляхів і заходів щодо зменшення викидів забруднюючих речовин від систем спалювання біомаси, особливо у великих або промислових котлах [60]. Чисельне моделювання часто є цінним при аналізі теплопередачі та розподілу температури димових газів, як показано в [61]. Важливо зазначити, що не завжди чисельні результати досліджень надійні, щоб гарантувати виконання відповідних стандартів ЄС та директив в процесі експлуатації [62-63]. Тому для забезпечення достовірності результатів чисельні дослідження поєднуються з експериментальними вимірюваннями. Чисельна частина цього дослідження стосується моделювання процесу спалювання біомаси, а вхідні дані для моделювання отримують з експериментальних вимірювань.

3.2 Модель тепломасоперенесення в пальнику при горінні рослинних пелет

Як приклад, розглядаються результати розрахунку температурного режиму пальника, призначеного для спалювання пелет рослинного походження. Пальник має форму прямокутного паралелепіпеда висотою H і довжиною L . Всередині пальника на певній відстані S від його основи розташована металева сітка з електропідігрівом. На цій сітці розташовуються пелети, що укладені в декілька шарів. В нижній частині лівої бокової стінки пальника зроблено отвір для входу зовнішнього повітря в пальник. У верхній частині правої стінки розташовується отвір для виводу газоподібних продуктів горіння. Через цей отвір нагріті димові гази разом з повітрям відводяться до теплообмінного пристрою, де утилізується одержана від згорання пелет теплота.

Рух повітря в пальнику здійснюється за рахунок природної тяги, тобто, внаслідок природної конвекції нагрітого повітря. Цей рух описується системою рівнянь динаміки турбулентної течії, до якої входять:

- рівняння нерозривності:

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho_g u}{\partial x} + \frac{\partial \rho_g v}{\partial y} + \frac{\partial \rho_g w}{\partial z} = 0 \quad (3.1)$$

- рівняння турбулентного перенесення імпульсу

$$\begin{aligned} \rho_g \left(\frac{\partial u}{\partial \tau} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial u}{\partial x} \right] \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right]; \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} \rho_g \left(\frac{\partial v}{\partial \tau} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \\ + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] - \rho_g g; \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \rho_g \left(\frac{\partial w}{\partial \tau} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + \\ &= + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial w}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad (3.4)$$

де x, y, z – прямокутні координати, м; u, v, w – проекції вектора швидкості на осі OX, OY та OZ прямокутної системи координат, м/с; p – тиск, Па; ρ – густина газового середовища, кг/м³; μ, μ_t – молекулярний і турбулентний динамічні коефіцієнти в'язкості, Па·с, $g = 9,81$ м/с².

Для замикання системи рівнянь динаміки (3.2)-(3.4) застосовується k - ε модель турбулентності, яка включає в себе рівняння перенесення кінетичної енергії турбулентності k

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial k}{\partial \tau} + u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial y} + w \frac{\partial k}{\partial z} \right) &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial z} \right] + \mu_t S^2 - \rho \varepsilon; \end{aligned} \quad (3.5)$$

та рівняння дисипації кінетичної енергії турбулентності ε .

$$\begin{aligned} \rho_g \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} + u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + w \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \mu_t S^2 - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \end{aligned} \quad (3.6)$$

де

$$S = \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right]^{0,5}$$

$k, \text{ м}^2/\text{с}^2$ – енергія турбулентності; $\varepsilon, \text{ м}^2/\text{с}^3$ – дисипація енергії турбулентності; $C_1=1,44, C_2=1,92, \sigma_k=1, \sigma_\varepsilon=1,3$ – константи k - ε моделі турбулентності.

Коефіцієнт турбулентної в'язкості розраховується за виразом:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}; C_\mu = 0,09.$$

Газове середовище в даному випадку це суміш, що складається з різних газів. Тому його густина розраховується за виразом:

$$\rho = \sum_{i=1}^{i=k} \rho_i = \frac{p}{R_0 T \sum_{i=1}^{i=k} \left(\frac{Y_i}{M_i} \right)} \quad (3.7)$$

де T , К – температура, К; $R_0 = 8314$ Дж/(кмоль·К) – універсальна газова стала; ρ_i , кг/м³ – парціальна густина окремого компонента (з номером i) газової суміші; Y_i – відносна вагова концентрація окремого компонента (з номером i) газової суміші, що визначається як $Y_i = \frac{\rho_i}{\sum_{i=1}^{i=k} \rho_i}$; k – кількість компонентів

газової суміші; M_i , кг/кмоль – молекулярна маса компонента газової суміші.

Температура газової суміші в процесі горіння летючих газів має вигляд

$$\begin{aligned} \rho_g C_g \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\lambda_g + \frac{C_p \mu_t}{\sigma_T} \right) \frac{\partial T}{\partial x} \right] \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\lambda_g + \frac{C_p \mu_t}{\sigma_T} \right) \frac{\partial T}{\partial y} \right] &+ \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\lambda_g + \frac{C_p \mu_t}{\sigma_T} \right) \frac{\partial T}{\partial z} \right] + Q \end{aligned} \quad (3.8)$$

де C_p – теплоємність газової суміші, що визначається з виразу:

$$C_p = \frac{\sum_{i=1}^{i=k} C_{p,i} \rho_i}{\sum_{i=1}^{i=k} \rho_i}$$

при цьому

$$C_p \rho = \sum_{i=1}^{i=k} C_{p,i} \rho_i$$

σ_T – турбулентне число Прандтля; $Q = \sum_n S_j \Delta h_j$ – сумарна теплота, що виділяється в газовому середовищі внаслідок протікання n хімічних реакцій; S_j , кг/(м³с); – швидкість протікання j -ї реакції, тобто, кількість j -ї речовини, що утворюється (або зникає) за рахунок хімічної реакції в 1 м³ об'єму за 1с часу; Δh_j , Дж/кг – тепловий ефект j -ї реакції, тобто, кількість енергії, що виділяється при спалюванні 1 кг відповідної горючої сировини.

Відносні вагові концентрації окремого компонента Y_i визначаються з розв'язання рівняння турбулентної дифузії для цього компонента. Ці рівняння мають вигляд:

$$\begin{aligned} \rho_g \left(\frac{\partial Y_i}{\partial \tau} + u \frac{\partial Y_i}{\partial x} + v \frac{\partial Y_i}{\partial y} + w \frac{\partial Y_i}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\rho_g D_i + \frac{\mu_t}{\sigma_D} \right) \frac{\partial Y_i}{\partial x} \right] + \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\rho_g D_i + \frac{\mu_t}{\sigma_D} \right) \frac{\partial Y_i}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\rho_g D_i + \frac{\mu_t}{\sigma_D} \right) \frac{\partial Y_i}{\partial z} \right] + S_i; \end{aligned} \quad (3.9)$$

Для розв'язання задачі про горіння пелет з сільськогосподарських злакових культур вважається, що при їх термічному розкладанні виділяються: водяна пара (H₂O, $i=3$); двоокис вуглецю (CO₂, $i=4$), окис вуглецю (CO, $i=5$); метан (CH₄, $i=6$) та водень (H₂, $i=7$). В повітряному потоці, що надходить в пальник ззовні, присутні азот (N₂, $i=1$) та кисень (O₂, $i=2$). В дійсності цих компонентів може біти значно більше (наприклад, окисли азоту типу NO_x), але а першому наближенні для розв'язання поставленої задачі можна обмежитися сімома наведеними компонентами газової суміші.

Цих рівнянь типу (3.9) має бути на одиницю менше, ніж кількість компонентів газової суміші (тобто, $k-1$ рівняння). Якщо б рівнянь було б k , то їх сума склала би рівняння нерозривності (3.1). Можна прийняти, що не

розв'язується рівняння (3.9) для азоту $i=1$. Його відносна концентрація знаходиться з виразу $Y_1 = 1 - \sum_{i=2}^{i=k} Y_i$.

Як вже згадувалося, при нагріванні органічного матеріалу, з якого складається біопаливо, починається процес його термічного розкладання з виділенням летючих газів. Для визначення швидкості утворення летючих газів при термічному розкладанні сировини з соломи злакових культур в [64] запропоновано вираз:

$$r_v = -\rho_{sb} \frac{dY_v}{d\tau} = \rho_{sb} Y_v A_v \exp\left(-\frac{E_v}{RT}\right) \quad (3.10)$$

де r_v , кг/(м³с) – інтенсивність виходу летючих газів Y_v – масова частка летючих газоподібних речовин, що залишаються в соломі; ρ_{sb} , кг/м³ – густина біомаси, що залишається у вихідній сировині; T , К – температура твердої компоненти біомаси. Величини, що входять до виразу (2.10), згідно [37], дорівнюють: $A_v=3,63 \cdot 10^4$ 1/с; $E_v/R=9340$ К.

Летючі гази видаляються через поверхню частинки біопалива і потрапляють в повітряний потік. Виходячи з (3.10), лінійну швидкість виходу летючих газів з поверхні частинки можна оцінити за виразом:

$$w_v = \frac{r_v V_p}{\rho_v F_p} = -\rho_{sb} \frac{dY_v}{d\tau} \frac{V_p}{\rho_v F_p} = \frac{V_p \rho_{sb} Y_v A_v \exp\left(-\frac{E_v}{RT}\right)}{\rho_v F_p} \quad (3.11)$$

де V_p , м³ – об'єм пелети; F_p – площа поверхні пелети м²; r_v – інтенсивність виходу летючих газів, кг/(м³с); ρ_v – густина летючих газів, кг/м³.

Склад летючих газів, що виділяються з сухої біомаси злакових культур при їх термічному розкладанні, приймається наступним: $Y_3 = 0,18$ (H₂O); Y_4

$=0,207$ (CO_2); $Y_5=0,272$ (CO); $Y_6=0,34$ (CH_4); $Y_7=0,001$ (H_2). Серед цих газів в реакції горіння приймають участь CO ; CH_4 та H_2 .

Температурний стан окремої пелети, що знаходиться в шарі з пелетного палива на сітці, розраховується за спрощеною моделлю, запропонованою в [65]:

$$\frac{\partial(C_p \rho T)}{\partial \tau} = -\nabla \cdot (C_p \rho w_v T) - \nabla \cdot q + S_c \Delta h_c \quad (3.12)$$

В даному рівнянні ліва частина описує швидкість зміни у часі теплоти в одиниці об'єму речовини пелети. Перший член у правій частині – це швидкість зміни теплової енергії в одиниці об'єму через конвекцію, а другий член – це внесок теплоти в одиницю об'єму шляхом її перенесення теплопровідністю. Третій член в правій частині визначає кількість теплової енергії, що виділяється в одиниці об'єму внаслідок екзотермічної хімічної реакції.

Рівняння (3.9) містять складові S_i , що описують утворення або зникнення з суміші газів i -ї речовини внаслідок хімічних реакцій. Її розмірність – $\text{кг}/(\text{м}^3\text{с})$, тобто вона виражає масу, що утворюється в одиниці об'єму в одиницю часу. Тобто вона еквівалентна величині r_v , що описується рівнянням (3.10). Серед летючих газів, що виділяються при термічному розкладанні біомаси, гази CO ; CH_4 та H_2 приймають участь в реакціях окислення з виділенням теплоти. За найпростішою схемою горіння летючих газів, розглядаються три наступні реакції окислення:



Швидкість реакції окислення окислу вуглецю CO до двоокису вуглецю CO_2 зазвичай розраховується за законом діючих мас, що має вигляд

$$\frac{\partial[\text{CO}]}{\partial \tau} = k_{\text{CO}}(T)[\text{CO}] \cdot [\text{O}_2]^{0,5} \cdot [\text{H}_2\text{O}]^{0,5} \quad (3.16)$$

або

$$\frac{\partial[\text{CO}]}{\partial\tau} = k_{\text{CO}}(T)[\text{CO}] \cdot [\text{O}_2]^{0,25} \cdot [\text{H}_2\text{O}]^{0,5} \quad (3.17)$$

Величини, що стоять в квадратних скобках, наприклад $[\text{CO}]$, виражають мольну концентрацію газу в газовій суміші і має розмірність $[\text{моль}/\text{м}^3]$, або $[\text{кмоль}/\text{м}^3]$. Коефіцієнт $k(T)$ визначає залежність швидкості реакції від температури. Зазвичай він має вигляд:

$$k(T) = A \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right),$$

де A – коефіцієнт, що визначається з експерименту; E – енергія активації, величина якої також визначається з експерименту.

Для величин A та E в літературі пропонуються різні варіанти. В [65], наприклад, для визначення $k(T)$ в формулі (2.16) пропонується вираз:

$$k_{\text{CO}}(T) = 3,25 \times 10^7 \exp\left(-\frac{15098}{T}\right).$$

Для визначення $k(T)$ в формулі (3.17) в [66], пропонується залежність

$$k_{\text{CO}}(T) = 10^{17,6} \times \exp\left(-\frac{166000}{8,314 \cdot T}\right).$$

Для цього ж рівняння в [60] запропоновано наступний вираз:

$$k_{\text{CO}}(T) = 2,32 \times 10^{12} \times \exp\left(-\frac{167000}{8,314 \cdot T}\right) \quad (3.18)$$

Для швидкості реакції окислення водню (3.14) зазвичай застосовується формула

$$\frac{\partial[\text{H}_2]}{\partial\tau} = k_{\text{H}_2}(T) \cdot [\text{O}_2] \cdot [\text{H}_2]^{1,5} \quad (3.19)$$

або

$$\frac{\partial[\text{H}_2]}{\partial\tau} = k_{\text{H}_2}(T) \cdot [\text{O}_2] \cdot [\text{H}_2]. \quad (3.20)$$

Для коефіцієнта $k(T)$ у формулі (3.19) в [67] пропонується наступний вираз:

$$k_{\text{H}_2}(T) = 51,8 \cdot T^{3/2} \cdot 10^{12} \exp\left(-\frac{3420}{T}\right)$$

Для коефіцієнту швидкості реакції $k(T)$ в формулі (3.20) в [68] запропоновано співвідношення:

$$k_{\text{H}_2}(T) = 1,08 \cdot 10^{13} \cdot \exp\left(-\frac{125000}{8,314 \cdot T}\right) \quad (3.21)$$

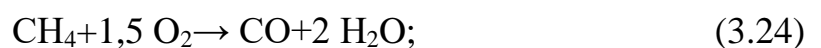
Швидкість реакції окислення метану CH_4 до CO_2 та H_2O в [68] описується формулою

$$\frac{\partial[\text{CH}_4]}{\partial\tau} = k_{\text{CH}_4}(T) [\text{CH}_4] \cdot [\text{O}_2] \quad (3.22)$$

в якій коефіцієнт швидкості реакції розраховується за формулою

$$k_{\text{CH}_4}(T) = 5,16 \cdot 10^{13} T^{-1} \times \exp\left(-\frac{130000}{8,314 \cdot T}\right) \quad (3.23)$$

Реакція метану з киснем в ряді випадків проходить через дві стадії:





Для швидкості реакції (3.24) зазвичай застосовуються формули хімічної кінетики у вигляді:

$$\frac{\partial[\text{CH}_4]}{\partial\tau} = k_{\text{CH}_4}(T)[\text{CH}_4]^m \cdot [\text{O}_2]^n. \quad (3.25)$$

Для формули (3.25) пропонується прийняти: $m=0,7$; $n=0,8$ [39];

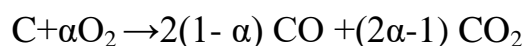
$$k_{\text{CH}_4}(T) = 1,6 \cdot 10^{10} \cdot \exp\left(-\frac{24157}{T}\right)$$

а також: $m=0,5$; $n=1,0$;

$$k_{\text{CH}_4}(T) = 9,2 \cdot 10^6 \cdot \exp\left(-\frac{80000}{8,314 \cdot T}\right) \cdot T$$

Після виходу летючих газів, в пелетах залишається вуглець і неорганічні компоненти, які утворюють золу. Вуглець також вступає в хімічну реакцію з киснем повітря. На відміну від реакції горіння летючих газів, що є гомогенними реакціями, реакція твердого вуглецю з киснем відноситься до гетерогенних реакцій. Вуглець в органічному паливі після виходу летючих має вигляд пористої речовини. Його реакція з киснем відбувається на поверхнях каналів пор. Тому можна вважати, що виділення теплоти при такій екзотермічній реакції відбувається всередині пелет. Цей ефект відображається в рівнянні (3.12) у вигляді доданку, що виражає потужність внутрішніх джерел теплоти $S_c \Delta h_c$. Швидкість реакції окислення вуглецю S_c розраховується за відповідними рівняннями хімічної кінетики, які мають вигляд, дещо відмінний від рівнянь для гомогенних реакцій, що вже розглядалися.

При реакції твердого вуглецю з киснем зазвичай утворюються як окис CO, так і двоокис CO₂ вуглецю. Тому реакція вуглецю з киснем описується рівнянням вигляду:



де стехіометичні коефіцієнти α цієї реакції, які характеризують необхідну кількість молей кисню для цієї реакції на один моль вуглецю, залежить від температури і визначаються з наведеного в [69] співвідношення:

$$\alpha = 33 \times \exp\left(-\frac{4700}{T}\right) \quad (3.26)$$

Швидкість реакції окислення вуглецю залежить як від хімічної кінетики цієї реакції, так і від інтенсивності дифузії кисню до поверхні, на якій відбувається реакція. Вираз, наведений в [69] для швидкості реакції окислення вуглецю, має вигляд:

$$r_c = A_p \frac{k_c k_D}{k_c + k_D} p_{O_2}, \text{ кг}/(\text{м}^3\text{с}) \quad (3.27)$$

де $A_p = F_p/V_p$, м^{-1} – відношення поверхні частинки до її об'єму; p_{O_2} – парціальний тиск кисню в газовому середовищі біля частинки (атм); k_c – константа хімічної реакції, k_D – коефіцієнт масообміну.

Величини k_c та k_D , що входять до виразу (3.27), розраховуються за формулами:

$$k_c = 497 \times \exp\left(-\frac{8540}{T}\right), \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с атм}) \quad (3.28)$$

$$k_D = \frac{2,53 \cdot 10^{-7}}{r_{out}} T^{0,75}, \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с атм}) \quad (3.29)$$

де r_{out} , м – зовнішній радіус частинки.

Система рівнянь (3.1)-(3.9); (3.12) доповнюється рівнянням стану ідеального газу, яким вважається повітря з продуктами згорання.

$$p_g = \rho_g \frac{R_0 T}{M_a} \quad (3.30)$$

$$\text{де } \rho_g = \sum_{i=1}^{i=k} \rho_i; \quad p_g = \sum_{i=1}^{i=k} p_i.$$

Тепловий ефект від наведених хімічних реакцій летючих газів та вуглецю з киснем представлено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Теплові ефекти реакцій окислення горючих компонентів вуглецевого палива

Реакції	Тепловий ефект реакції	
	кДж/кмоль	кДж/кг
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	408 860	34 070
$C + 1/2 O_2 \rightarrow CO$	123 220	10 268
$CO + 1/2 O_2 \rightarrow CO_2$	285 640	-
$H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O$	241 800	-
$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	805 560	-

Для кожного компонента газової суміші також записується рівняння стану у вигляді $p_i = \rho_i \frac{R_0 T}{M_i}$.

Для системи рівнянь (3.1)-(3.9); (3.12) задаються наступні граничні умови:

- на вході в пальник:

$$p=p_{in}; T = T_{in}; v=0; w=0; \frac{\partial k}{\partial x} = 0; \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = 0; Y_i = Y_{i,in} \quad (3.31)$$

- на виході з пальника:

$$p=p_{out}; \frac{\partial T}{\partial x} = 0; v=0; w=0; \frac{\partial k}{\partial x} = 0; \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = 0; \frac{\partial Y_i}{\partial x} = 0; \quad (3.32)$$

- на поверхнях пелет:

$$w_n = w_v; -\lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial n} \Big|_{n=-0} = -\lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial n} \Big|_{n=+0} + q_r; k=0; \varepsilon=0, Y_i = Y_{i,p} \quad (3.33)$$

де n – зовнішня до поверхні пелети нормаль; w_n – швидкість, нормальна до поверхні пелети; q_r – радіаційний тепловий потік, що виходить з поверхні пелети.

- на внутрішніх поверхнях стін пальника (індекс w):

$$u=0; v=0; w=0; -\lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial n} \Big|_{n=-0} = -\lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial n} \Big|_{n=+0} + q_r; k=0; \varepsilon=0; \frac{\partial Y_i}{\partial n} = 0; \quad (3.34)$$

n – зовнішня до поверхні стін пальника нормаль; q_r – радіаційний тепловий потік на внутрішніх поверхнях стін пальника;

- на зовнішніх поверхнях стін пальника (індекс w):

$$u=0; v=0; w=0; -\lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial n} \Big|_{n=-0} = \alpha_{r,c} (T_w - T_\infty); k=0; \varepsilon=0 \quad (3.35)$$

де $\alpha_{r,c}$ – радіаційно-конвекційний коефіцієнт тепловіддачі на зовнішній поверхні пальника; T_∞ – температура зовнішнього повітря

3.3 Дослідження тепломасообміну при горінні агропелет в пальнику

Система рівнянь (3.1)-(3.9); (3.12) розв'язується методом скінчених різниць. Задача розв'язується у двовимірній постановці. Для цього будується двовимірна прямокутна розрахункова сітка з кроками dx_j (довжина кроку з номером j різницевої сітки вздовж осі OX); dy_i (довжина кроку з номером i різницевої сітки вздовж осі OY). Довжини кроків можуть змінюватися в залежності від їх номеру. Для вирішення цієї задачі застосовується рознесена розрахункова сітка [70]. Її особливість полягає в тому, що скалярні сіточні функції $p_{i,j}$ (тиск), $T_{i,j}$ (температура), $k_{i,j}$ (кінетична енергія турбулентності), $\varepsilon_{i,j}$

(дисипація енергії турбулентності); $\mu_{i,j}$ (турбулентна в'язкість) – локалізуються в точках, що розташовуються посередині чарунки (елемента) розрахункової сітки. Сіточні функції, що відтворюють складові вектора швидкості, прив'язуються до вузлів, що розташовуються на гранях розрахункового елемента.

На середині правої грані знаходиться точка, з якою пов'язується сіточна функція $u_{i,j}$, а на середині верхньої грані – точка, з якою пов'язується функція $v_{i,j}$. На середині лівої грані буде, відповідно, точка, що відтворює функцію $u_{i,j-1}$, а на середині нижньої грані – точка, що відповідатиме функції $v_{i-1,j}$. Перший індекс у сіточних функціях відповідає номеру даного розрахункового елемента по вертикалі, а другий індекс – його номеру по горизонталі (рисунок 3.1).

З урахуванням вищесказаного, складаються різницеві рівняння, що апроксимують рівняння (3.1)-(3.3) для динаміки двовимірного газового потоку:

$$\frac{u_{i,j} - u_{i,j-1}}{dx_j} + \frac{v_{i,j} - v_{i-1,j}}{dy_i} = 0; \quad (3.36)$$

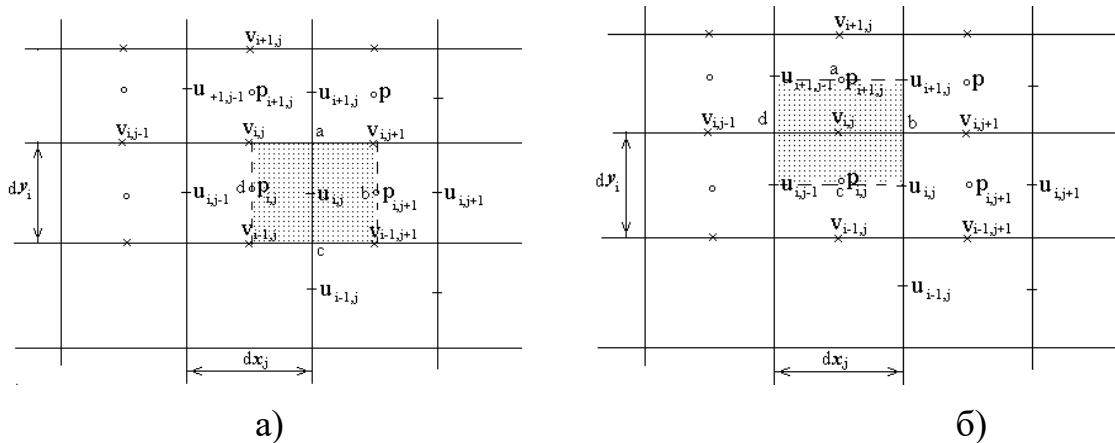


Рис. 3.1 Фрагмент розрахункової сітки

$$\begin{aligned}
& \frac{u_{i,j} - u_{i,j}^*}{d\tau} + u_{i,j}^* \left(c_{x1} \frac{u_{i,j+1} - u_{i,j}}{dx_{j+1}} + c_{x2} \frac{u_{i,j} - u_{i,j-1}}{dx_j} \right) + \\
& + v_{i-1/2,j+1/2}^* \left(c_{y1} \frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{dy_{i+1/2}} + c_{y2} \frac{u_{i,j} - u_{i-1,j}}{dy_{i-1/2}} \right) = \frac{p_{i,j} - p_{i,j+1}}{\rho^* dx_{j+1/2}} + \\
& + 2 \frac{\mu_{i,j+1}^*}{\rho_{i,j+1}^*} \cdot \frac{u_{i,j+1} - u_{i,j}}{dx_{j+1} dx_{j+1/2}} - 2 \frac{\mu_{i,j}^*}{\rho_{i,j}^*} \cdot \frac{u_{i,j} - u_{i,j-1}}{dx_j dx_{j+1/2}} + \\
& + \frac{\mu_{i+1/2,j+1/2}^*}{\rho_{i+1/2,j+1/2}^*} \cdot \left(\frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{dy_i dy_{i+1/2}} + \frac{v_{i,j+1} - v_{i,j}}{dy_i dx_{j+1/2}} \right) - \\
& - \frac{\mu_{i-1/2,j+1/2}^*}{\rho_{i-1/2,j+1/2}^*} \left(\frac{u_{i,j} - u_{i-1,j}}{dy_i dy_{i-1/2}} + \frac{v_{i-1,j+1} - v_{i-1,j}}{dy_i dx_{j+1/2}} \right)
\end{aligned} \tag{3.37}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{v_{i,j} - v_{i,j}^*}{d\tau} + u_{i+1/2,j-1/2}^* \left(c_{x1} \frac{v_{i,j+1} - v_{i,j}}{dx_{j+1/2}} + c_{x2} \frac{v_{i,j} - v_{i,j-1}}{dx_{j+1/2}} \right) + \\
& + v_{i,j}^* \left(c_{y1} \frac{v_{i+1,j} - v_{i,j}}{dy_{i+1/2}} + c_{y2} \frac{v_{i,j} - v_{i-1,j}}{dy_{i-1/2}} \right) = \frac{p_{i,j} - p_{i+1,j}}{\rho^* dy_{i+1/2}} + \\
& + \frac{\mu_{i+1/2,j+1/2}^*}{\rho_{i+1/2,j+1/2}^*} \left(\frac{v_{i,j+1} - v_{i,j}}{dx_j dx_{j+1/2}} + \frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{dx_j dy_{i+1/2}} \right) - \\
& - \frac{\mu_{i+1/2,j-1/2}^*}{\rho_{i+1/2,j-1/2}^*} \left(\frac{v_{i,j} - v_{i,j-1}}{dx_j dx_{j-1/2}} + \frac{u_{i+1,j-1} - u_{i,j-1}}{dx_j dy_{i+1/2}} \right) + \\
& + 2 \frac{\mu_{i+1,j}^*}{\rho_{i+1,j}^*} \frac{v_{i+1,j} - v_{i,j}}{dy_{i+1/2} dy_{i+1}} - 2 \frac{\mu_{i,j}^*}{\rho_{i,j}^*} \frac{v_{i,j} - v_{i-1,j}}{dy_{i+1/2} dy_i} - g^* \beta(T - T_\infty);
\end{aligned} \tag{3.38}$$

Рівняння енергії для газового середовища (3.8) в скінчених різницях має вигляд:

$$\begin{aligned}
& C_g^* \rho_g^* \left(\frac{T_{i,j} - T_{i,j}^*}{d\tau} + u_{i,j-1/2}^* \left(c_{x1} \frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{dx_{j+1/2}} + c_{x2} \frac{T_{i,j} - T_{i,j-1}}{dx_{j-1/2}} \right) + \right. \\
& \left. + v_{i-1/2,j}^* \left(c_{y1} \frac{T_{i+1,j} - T_{i,j}}{dy_{i+1/2}} + c_{y2} \frac{T_{i,j} - T_{i-1,j}}{dy_{i-1/2}} \right) \right) = \\
& = (S_5^* \Delta h_5 + S_6^* \Delta h_6 + S_7^* \Delta h_7)_{i,j} +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \left(\lambda_g + \frac{C_p^* \mu_{i,j+1/2}^*}{\sigma_T} \right) \frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{dx_j dx_{j+1/2}} - \left(\lambda_g + \frac{C_p^* \mu_{i,j-1/2}^*}{\sigma_T} \right) \frac{T_{i,j} - T_{i,j-1}}{dx_j dx_{j-1/2}} + \\
& + \left(\lambda_g + \frac{C_p^* \mu_{i+1/2,j}^*}{\sigma_T} \right) \frac{T_{i+1,j} - T_{i,j}}{dy_i dy_{i+1/2}} - \left(\lambda_g + \frac{C_p^* \mu_{i-1/2,j}^*}{\sigma_T} \right) \frac{T_{i,j} - T_{i-1,j}}{dy_i dy_{i-1/2}} ; \quad (3.39)
\end{aligned}$$

Рівняння (3.9) для перенесення маси компонента газової суміші з номером k енергії для газового середовища (3.8) в скінчених різницях має вигляд:

$$\begin{aligned}
& \rho_g \left(\frac{Y_{k,i,j} - Y_{k,i,j}^*}{d\tau} + u_{i,j-1/2}^* \left(c_{x1} \frac{Y_{k,i,j+1} - Y_{k,i,j}}{dx_{j+1/2}} + c_{x2} \frac{Y_{k,i,j} - Y_{k,i,j-1}}{dx_{j-1/2}} \right) + \right. \\
& \left. + v_{i-1/2,j}^* \left(c_{y1} \frac{Y_{k,i+1,j} - Y_{k,i,j}}{dy_{i+1/2}} + c_{y2} \frac{Y_{k,i,j} - Y_{k,i-1,j}}{dy_{i-1/2}} \right) \right) = S_k^* + \\
& + \left(\rho_g^* D_g + \frac{\mu_{i,j+1/2}^*}{\sigma_D} \right) \frac{Y_{k,i,j+1} - Y_{k,i,j}}{dx_j dx_{j+1/2}} - \left(\rho_g^* D_g + \frac{\mu_{i,j-1/2}^*}{\sigma_D} \right) \frac{Y_{k,i,j} - Y_{k,i,j-1}}{dx_j dx_{j-1/2}} + \\
& + \left(\rho_g^* D_g + \frac{\mu_{i+1/2,j}^*}{\sigma_D} \right) \frac{Y_{k,i+1,j} - Y_{k,i,j}}{dy_i dy_{i+1/2}} - \left(\rho_g^* D_g + \frac{\mu_{i-1/2,j}^*}{\sigma_D} \right) \frac{Y_{k,i,j} - Y_{k,i-1,j}}{dy_i dy_{i-1/2}}
\end{aligned} \quad (3.40)$$

В різницевих рівняннях (3.37)-(3.40) $d\tau$ – крок за часом. Ці рівняння складено за неявною розрахунковою схемою. Тобто, сіточні функції, що до нього входять відносяться до поточного моменту часу і є невідомими величинами. Величини, що є відомими з розв'язання задачі на попередньому часовому кроці позначені в цих рівняннях індексом $*$.

Рівняння (3.5) для кінетичної енергії турбулентності та (3.6) для дисипації кінетичної енергії також представляються в скінчено-різницевій формі. Їх апроксимація виконується за такою ж схемою, що і рівняння (3.8) та (3.9) і будуть мати вигляд, подібний до (3.39) та (3.40).

Рівняння (3.12) енергії для поодинокій пелети переписується у вигляді рівняння теплового балансу. При цьому наближено вважається, що пелета має форму прямокутного паралелепіпеда довжиною dx_j та висотою dy_i . В такому

випадку, $V_p = dx_j \cdot dy_i \cdot b$; $F_p = 2 \cdot b \cdot (dx_j + dy_i)$. Величина b (характерний розмір за третьою координатою OZ) вважається рівною одиниці.

Рівняння теплового балансу для окремої пелети має вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{dy_i dx_j \rho_p^* C_p^* T_{i,j}}{d\tau} = & \frac{dy_i dx_j \rho_p^* C_p^* T_{i,j}^*}{d\tau} - \\ & - \left(dx_j T_{i+1/2,j} + dx_j T_{i-1/2,j} + dy_i T_{i,j+1/2} + dy_i T_{i,j-1/2} \right) \rho_g^* C_g^* w_v^* + \\ & + dy_i \left(\frac{\lambda_p (T_{i,j+1/2} - T_{i,j})}{0,5 dx_j} - \frac{\lambda_p (T_{i,j} - T_{i,j-1/2})}{0,5 dx_j} \right) \\ & + dx_j \left(\frac{\lambda_p (T_{i+1/2,j} - T_{i,j})}{0,5 dy_i} - \frac{\lambda_p (T_{i,j} - T_{i-1/2,j})}{0,5 dy_i} \right) + dy_i dx_j S_c^* \Delta h_c \end{aligned} \quad (3.41)$$

Рівняння (3.41) містить сіточні функції температури з дробовими індексами $T_{i+1/2,j}$; $T_{i-1/2,j}$; $T_{i,j+1/2}$; $T_{i,j-1/2}$, які відносяться до вузлів, розташованих на гранях розрахункового елемента, де розташовуються вузли для сіточних функцій, що відповідають складовим швидкості (рисунок 3.1). Ці сіточні функції температури не відносяться до тих вузлів сітки, в яких повинні знаходитися сіточні функції температури. Тому вони повинні бути вилучені з рівняння (3.41). Для цього застосовуються умови спряження (3.33) на поверхнях пелет. В скінчених різницях ці умови мають вигляд:

$$\begin{aligned} -\lambda_g \frac{T_{i+1,j} - T_{i+1/2,j}}{0,5 \cdot dy_{i+1}} + \alpha_r^* (T_{i+1/2,j} - T_\infty) &= -\lambda_p \frac{T_{i+1/2,j} - T_{i,j}}{0,5 \cdot dy_i}; \\ -\lambda_g \frac{T_{i,j+1} - T_{i,j+1/2}}{0,5 \cdot dx_{j+1}} + \alpha_r^* (T_{i,j+1/2} - T_\infty) &= -\lambda_p \frac{T_{i,j+1/2} - T_{i,j}}{0,5 \cdot dx_j}; \\ -\lambda_g \frac{T_{i-1/2,j} - T_{i-1,j}}{0,5 \cdot dy_{i-1}} - \alpha_r^* (T_{i-1/2,j} - T_\infty) &= -\lambda_p \frac{T_{i,j} - T_{i-1/2,j}}{0,5 \cdot dy_i}; \\ -\lambda_g \frac{T_{i,j-1/2} - T_{i,j-1}}{0,5 \cdot dx_{j-1}} - \alpha_r^* (T_{i,j-1/2} - T_\infty) &= -\lambda_p \frac{T_{i,j} - T_{i,j-1/2}}{0,5 \cdot dx_j}, \end{aligned}$$

де α_r^* - радіаційний коефіцієнт тепловіддачі.

З цього рівняння визначаються величини $T_{i+1/2,j}$; $T_{i-1/2,j}$; $T_{i,j+1/2}$; $T_{i,j-1/2}$, що характеризують температуру на поверхні пелети:

$$T_{i+1/2,j} = \frac{\frac{\lambda_p}{0,5 \cdot dy_i}}{\frac{\lambda_g}{0,5 \cdot dy_{i+1}} + \frac{\lambda_p}{0,5 \cdot dy_i} + \alpha_r^*} T^{p_{i,j}} + \frac{\frac{\lambda_g}{0,5 \cdot \Delta y_{i+1}}}{\frac{\lambda_g}{0,5 \cdot dy_{i+1}} + \frac{\lambda_p}{0,5 \cdot dy_i} + \alpha_r^*} T^{g_{i+1,j}} + \frac{\alpha_r^* T_w}{\frac{\lambda_g}{0,5 \cdot dy_{i+1}} + \frac{\lambda_p}{0,5 \cdot dy_i} + \alpha_r^*} ;$$

$$T_{i,j+1/2} = + \frac{\frac{\lambda_p}{0,5 \cdot \Delta x_j}}{\frac{\lambda_g}{0,5 \cdot \Delta x_{j+1}} + \frac{\lambda_p}{0,5 \cdot \Delta x_j} + \alpha_r^*} T_{i,j} + \frac{\frac{\lambda_g}{0,5 \cdot \Delta x_{j+1}}}{\frac{\lambda_g}{0,5 \cdot \Delta x_{j+1}} + \frac{\lambda_p}{0,5 \cdot \Delta x_j} + \alpha_r^*} T_{i,j+1} + \frac{\alpha_r^* T_w}{\frac{\lambda_g}{0,5 \cdot \Delta x_{j+1}} + \frac{\lambda_p}{0,5 \cdot \Delta x_j} + \alpha_r^*} ;$$

$$T_{i-1/2,j} = \frac{\frac{\lambda_p}{0,5 \cdot \Delta y_i}}{\frac{\lambda_g}{0,5 \cdot \Delta y_{i-1}} + \frac{\lambda_p}{0,5 \cdot \Delta y_i} + \alpha_r^*} T_{i,j} + \frac{\frac{\lambda_g}{0,5 \cdot \Delta y_{i-1}}}{\frac{\lambda_g}{0,5 \cdot \Delta y_{i-1}} + \frac{\lambda_p}{0,5 \cdot \Delta y_i} + \alpha_r^*} T_{i-1,j} + \frac{\alpha_r^* T_w}{\frac{\lambda_g}{0,5 \cdot \Delta y_{i-1}} + \frac{\lambda_p}{0,5 \cdot \Delta y_i} + \alpha_r^*} ;$$

$$T_{i,j-1/2} = \frac{\frac{\lambda_p}{0,5 \cdot \Delta x_j}}{\frac{\lambda_g}{0,5 \cdot \Delta x_{j-1}} + \frac{\lambda_p}{0,5 \cdot \Delta x_j} + \alpha_r^*} T_{i,j} + \frac{\frac{\lambda_g}{0,5 \cdot \Delta x_{j-1}}}{\frac{\lambda_g}{0,5 \cdot \Delta x_{j-1}} + \frac{\lambda_p}{0,5 \cdot \Delta x_j} + \alpha_r^*} T_{i,j-1} + \frac{\alpha_r^* T_w}{\frac{\lambda_g}{0,5 \cdot \Delta x_{j-1}} + \frac{\lambda_p}{0,5 \cdot \Delta x_j} + \alpha_r^*}$$

Знайдені величини $T_{i+1/2,j}$; $T_{i-1/2,j}$; $T_{i,j+1/2}$; $T_{i,j-1/2}$ підставляються в різницеві рівняння типу (3.41) для пелет. Після цього дані рівняння вже будуть містити лише сіткові функції температури в основних вузлах сітки.

Система різницевих рівнянь (3.36)-(3.41) розв'язується методом матричної прогонки [71].

3.4 Моделювання горіння пелет у побутових котлах малої потужності в середовищі програмного комплексу ANSYS-Fluent

3.4.1 Методика CFD-моделювання

З метою дослідження процесів, що відбуваються під час спалювання біомаси в пелетному пальнику, побудована його CFD-модель, яку реалізовано засобами ANSYS-Fluent (рисунок 3.1).

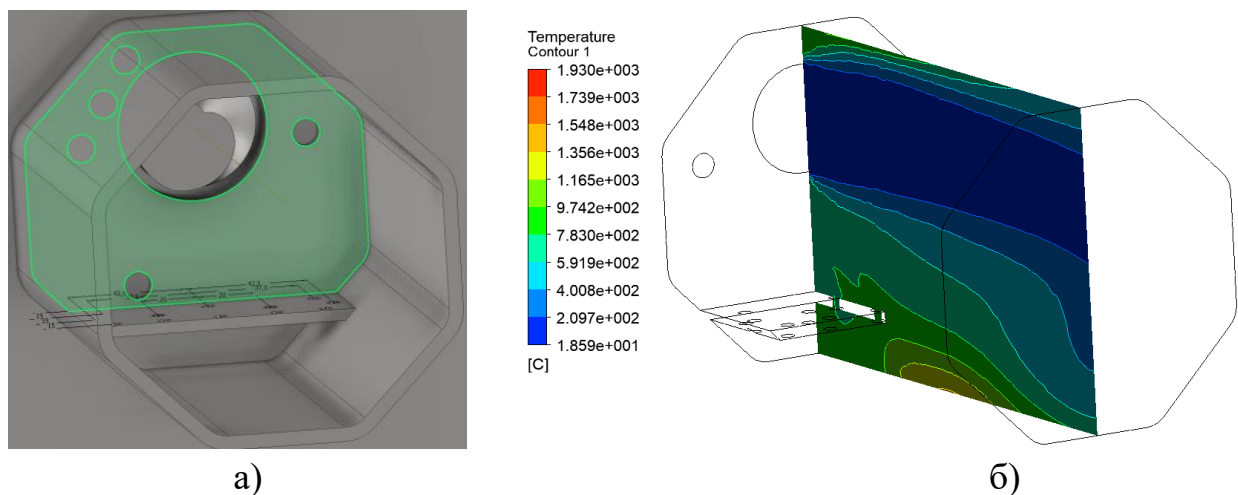


Рис. 3.1 Геометрична модель пальника (а) та орієнтовний розподіл температур в перерізі пальника (б)

Скінчено-елементна сітка моделі враховує розвиток примежового шару на всіх твердотільних поверхнях котельного агрегату. Область поза примежовим шаром моделювалась за допомогою нерівномірної тетраедричної сітки (рисунок 3.2) [72].

Після конвертації моделі в Fluent є можливість заощадити об'єм оперативної пам'яті комп'ютера при проведенні розрахунків шляхом об'єднання тетраедричних скінчених елементів в шестигранні. При цьому скошеність (Skewness) не перевищувала 0,8, а співвідношення сторін (AspectRatio) кінцевих елементів не перевищувало 40 (рисунок 3.3).

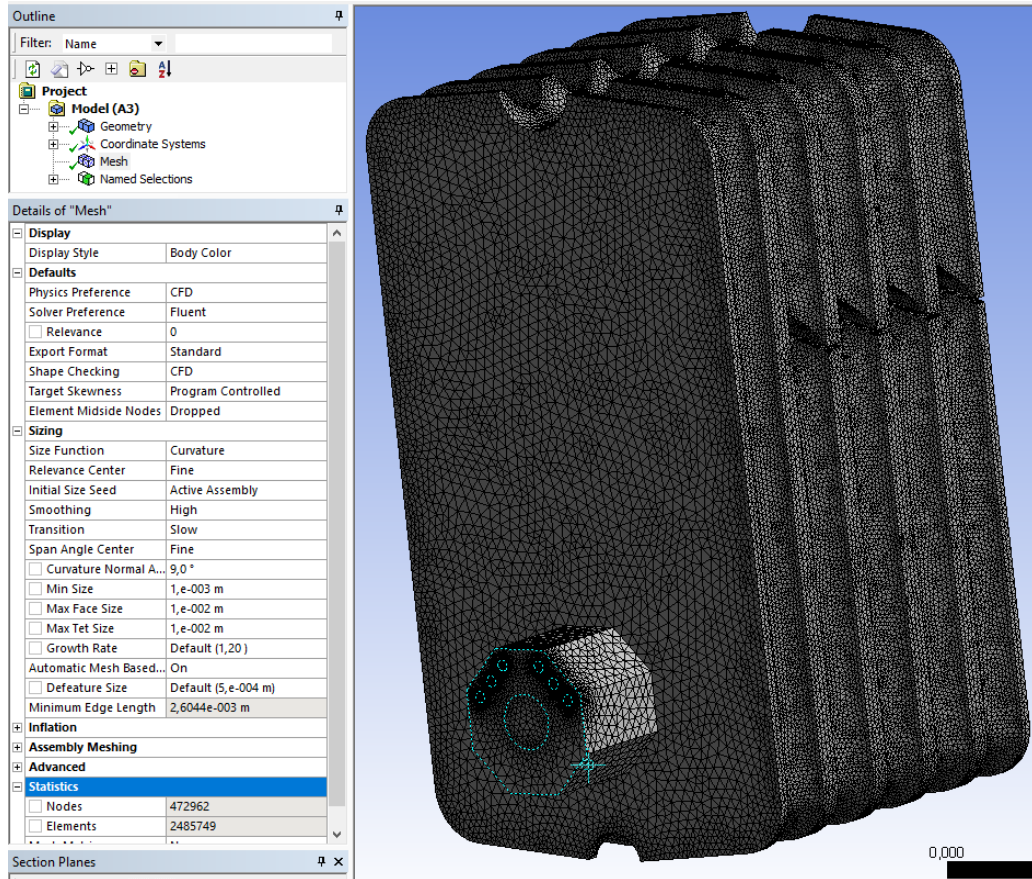


Рис. 3.2 Тетраедрична розрахункова сітка

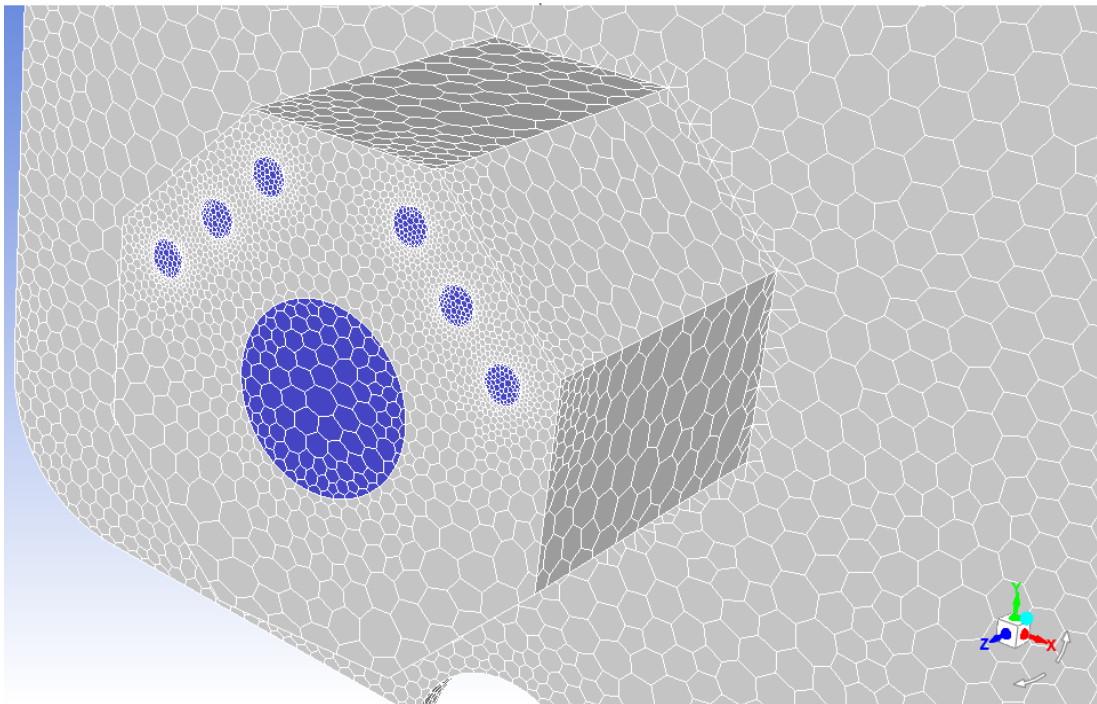


Рис. 3.3 Розрахункова сітка типу «Polyhedra»

Моделювання спалювання твердого палива виконувалось за допомогою скінчено-елементних CFD-моделей котельного агрегату в середовищі програмного комплексу ANSYS-Fluent.

Відомо, що явища переносу імпульсу і маси в хімічно реагуючих потоках описуються досить складною нелінійною системою рівнянь в часткових похідних. Ця система містить рівняння нерозривності, осереднені по Рейнольдсу рівняння збереження енергії, імпульсу і маси (Нав'є-Стокса), а також рівняння переносу i -го компонента суміші, які розв'язуються чисельними методами в середовищі Ansys-Fluent. Для моделювання складових тензора напруг Рейнольдса підхід Буссінеска, який є найбільш поширеним при числовому моделюванні.

Для замикання осереднених по Рейнольдсу рівнянь Нав'є-Стокса використовувалась Realizable k - ε модель турбулентності, що відрізняється від стандартної k - ε моделі альтернативним формулюванням виразу для розрахунку турбулентної в'язкості:

$$\mu = \frac{\rho}{\left(A_0 + A_s \frac{U^* k}{\varepsilon}\right)} \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (3.42)$$

де змінні A_0 , A_s та U^* є функцією градієнту швидкості.

Також Realizable k - ε модель турбулентності забезпечує позитивність нормальних напруг $\overline{(u'_i)^2} \geq 0$ виконання нерівності Шварца: $\overline{(u'_i u'_j)} \leq \overline{(u'_i)^2} \cdot \overline{(u'_j)^2}$ Транспортні рівняння для k та ε Realizable моделі турбулентності можна знайти в [44].

Використання в розробленій CFD-моделі обрано тому, що вона розроблена для потоків, що містять струмені (вприск нагрітого повітря крізь прошарок палива), примежові шари розвиваються під дією сильних несприятливих градієнтів тиску (омивання жаропротівних труб котельного агрегату), яке супроводжується відривом потоку, а також для урахування зон із сильною обтічною кривизною.

Для моделювання течії в примежовому шарі використані нерівноважні пристінні функції. Сильними сторонами яких є те, що вони призначені враховувати чутливість логарифмічного закону, який постулює розподіл швидкості потоку в примежовому шарі, до градієнта тиску. Тим самим вони краще прогнозують виникнення від'ємного градієнту тиску і появу зворотних течій, ніж стандартні пристінні функції.

Послаблені припущення локальної рівноваги для ТКЕ в чарунках-сусідах:

$$\frac{\tilde{U} C_{\mu}^{1/4} k^{1/2}}{\tau_w / \rho} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(E \frac{\rho C_{\mu}^{1/4} k^{1/2} y}{\mu} \right), \quad (3.43)$$

де

$$\tilde{U} = U - \frac{1}{2} \frac{dp}{dx} \left[\frac{y_v}{\rho \kappa^* k^{1/2}} \ln \left(\frac{y}{y_v} \right) + \frac{y - y_v}{\rho \kappa^* k^{1/2}} + \frac{y_v^2}{\mu} \right], \quad (3.44)$$

де y_v – відстань від непроникної твердої стінки до верхньої межі в'язкого підшару (зазвичай становить $y^+ \approx 5$), а y_n – відстань від непроникної твердої стінки до верхньої межі турбулентного ядра.

Температура в примежовому шарі розраховується наступним чином:

$$T^* = \frac{(T_w - T) \rho C_{\mu}^{1/4} k^{1/2}}{q''}, \quad (3.45)$$

де C_{μ} згідно використаної Realizable k - ε моделі турбулентності:

$$C_{\mu} = \frac{1}{\left(A_0 + A_s \frac{U^* k}{\varepsilon} \right)} \quad (3.46)$$

Після завдання гідродинамічних характеристик потоку використана модель горіння без попереднього змішування (non-premixed combustion model). Відправною точкою для її використання є створення PDF таблиці (PDF

– probability distribution function – функція розподілу вірогідності). Цей файл містить інформацію про залежність вмісту компонентів і температур від фракційного складу суміші і використовується ANSYS-Fluent для набуття цих значень в процесі рішення.

При визначенні PDF-таблиці використовувались рівняння Equilibrium Chemistry (Рівноважна хімія), які мають значно більшу точність. За допомогою цієї моделі є можливість включити ефекти проміжних реакцій і реакцій дисоціації, створюючи більш реалістичні прогнози температури полум'я, ніж загальноприйнята модель Eddy-Dissipation.

3.4.2 Теплогідравлічні особливості течії в «водяній сорочці» CFD-моделі котла

Під час виконання роботи було проведено моделювання топкової камери автоматичного котла на твердому паливі VIADRUS потужністю 25 кВт, що призначений насамперед для опалення односімейних будинків, дач, невеликих майстерень тощо [73]. В якості палива в котлі використовуються як деревні (так звані білі) пелети, так і пелети сільськогосподарського походження.

Головною частиною котла є чавунний секційний котельний корпус, виготовлений із сірого чавуну згідно з EN 1561 сорт 150. Котельний корпус зібраний із секцій за допомогою впресованих котелень і зафіксований за допомогою кріпильних болтів. Секції утворюють камеру згоряння та зольник, водний простір та конвекційну частину. Вхід та вихід опалювальної води розташований у задній частині котла. Задня секція котла у верхній частині має горловину димоходу та фланець опалювальної води, у нижній частині – фланець живильної води з патрубком для впускного та випускного крана. До передньої секції прикріплені дверцята для чищення зольника зі встановленим факельним пальником. В котлі використовується встановлений на дверях зольника пальник для пелет.

З правого (лівого) боку котла розміщено бункер для пелет із листової сталі об'ємом 300 л. Бункер з'єднаний з пальником за допомогою живильника палива та сполучного шлангу.

Для моделювання геометрії топкової камери котла використовується графічний редактор SolidWorks 2020. Модель містить чотири однакових секції (рисунок 3.4, а)), які складаються з опускних труб і водяного економайзера, і однієї секції, що містить тільки опускні труби (рисунок 3.4, б)). Така конструкція дозволяє відібрати більше теплоти від димових газів, що відходять. На рисунку 3.4, в) показано фото топкової камери діючого пелетного котла VIADRUS.

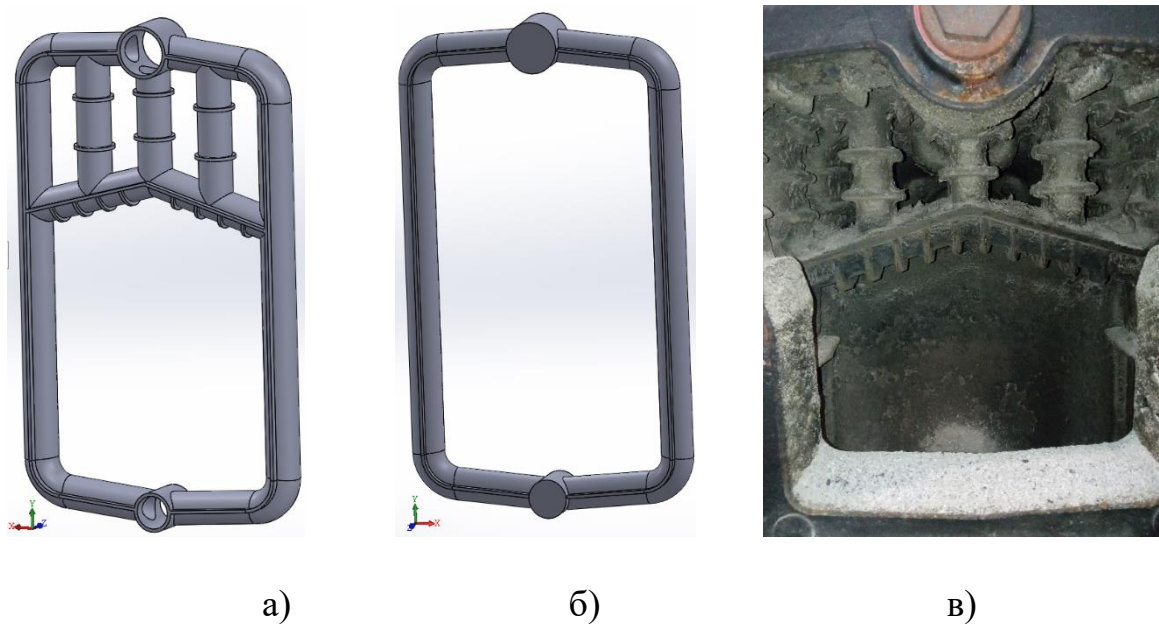


Рис. 3.4 Модель глибинної і першої секцій (а та б) та фото топкової камери котла (в)

З таких секцій зроблена тривимірна збірка і «заповнено» міжтрубний простір матеріалом для топкової камери. Тобто геометрія топкової камери, течія, в якій визначається засобами ANSYS-Fluent, отримана шляхом використання процедури логічного віднімання – від початкового об'єму, наприклад паралелепіпеда, віднімається об'єм всіх секцій, що зібрані у збірку (рисунок 3.4, 3.5).

На фронтальній стінці (рисунок 3.5 б)) показано модель факельного пальника восьмигранної форми, а на зворотній стінці (рисунок 3.5 в)) показано циліндричний димохід.

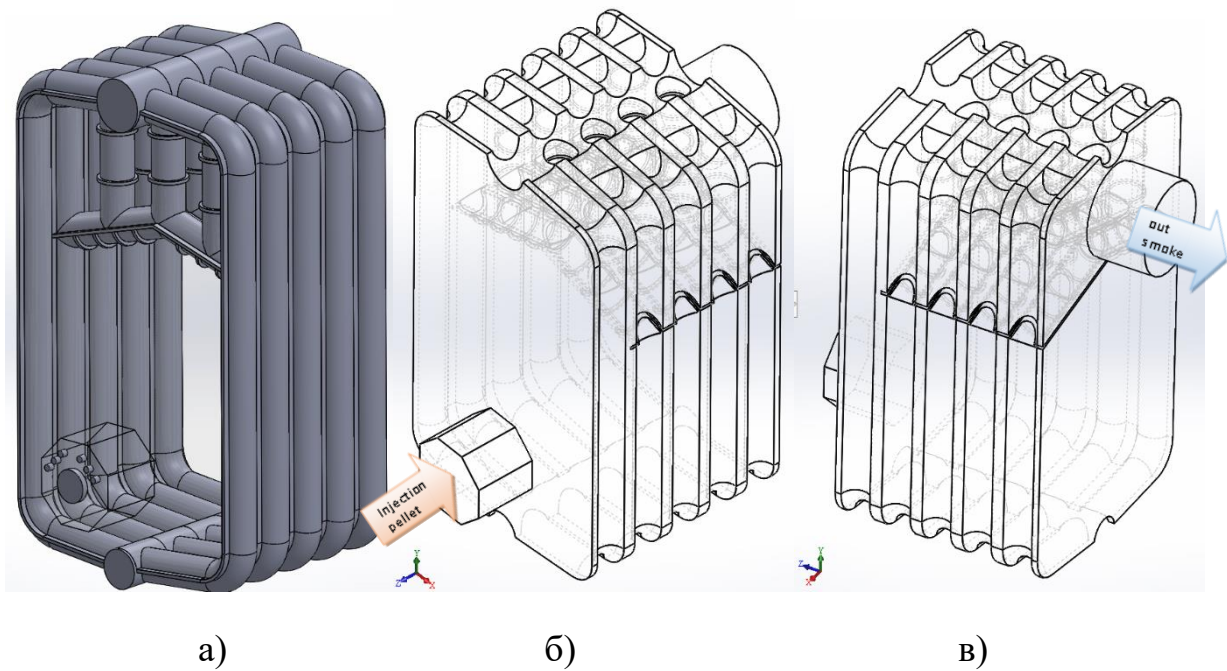
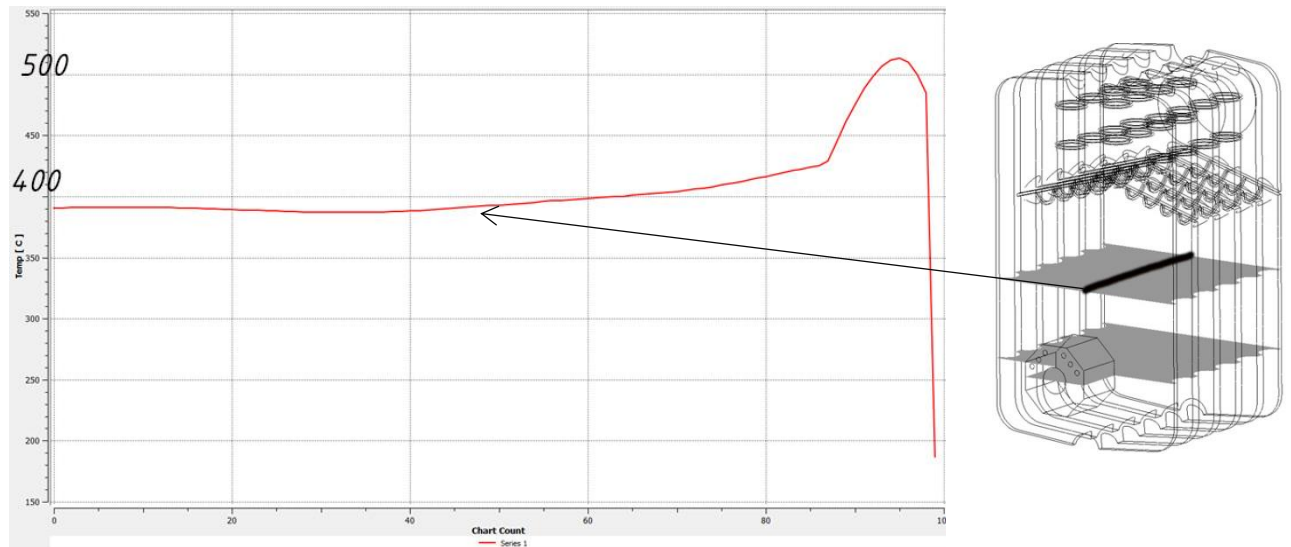
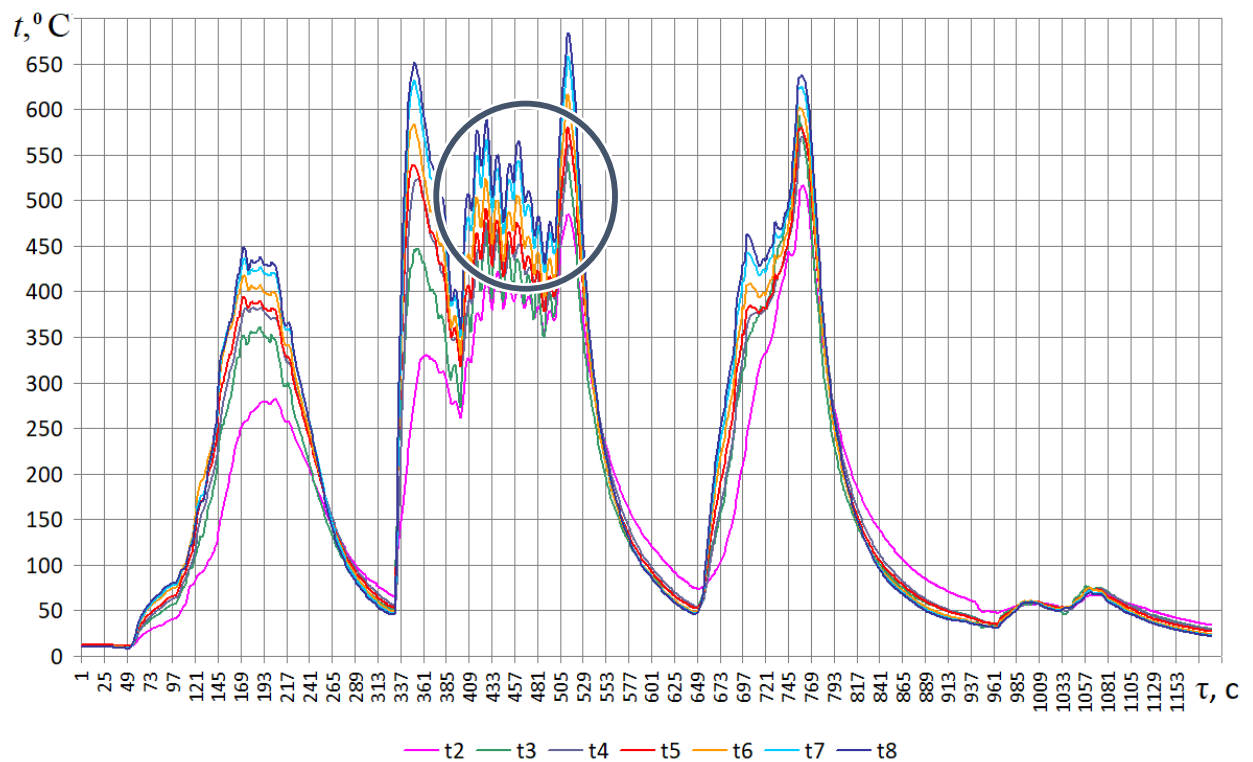


Рис. 3.5 Модель топкової камери пелетого котла VIADRUS A0C (а), фронтальний (б) і зворотній (в) види моделі топкової камери

Порівняння результатів вимірювання з отриманими результатами при моделюванні представлені на рисунку 3.6. Результати числових досліджень представлені у стаціонарній постановці, витрати палива і окисника для виконання розрахунків обрано з огляду на усталені показники вимірювання температур, що відповідає робочому режиму роботи котла (рисунок 3.6 б)). Тобто, порівняння результатів вимірів слід виконувати за температурним графіком у часовому діапазоні 400...500 с. Представлені результати відповідають максимальній витраті палива $1,2 \times 10^{-3}$ кг/с і швидкості подачі повітря на паливник 2 м/с. Слід зазначити, що діапазон вимірних температур знаходиться в діапазоні значень 400...550 °С. За результатами розрахунків максимум температур в обраному перетині відповідає 510 °С, а більшість температурного графіку знаходиться в районі ≈ 400 °С, таким чином співставлення результатів дає можливість зробити висновок про задовільне співпадіння даних і підтверджує можливість використання застосованої математичної моделі для дослідження робочого процесу паливкової системи котла.



а)



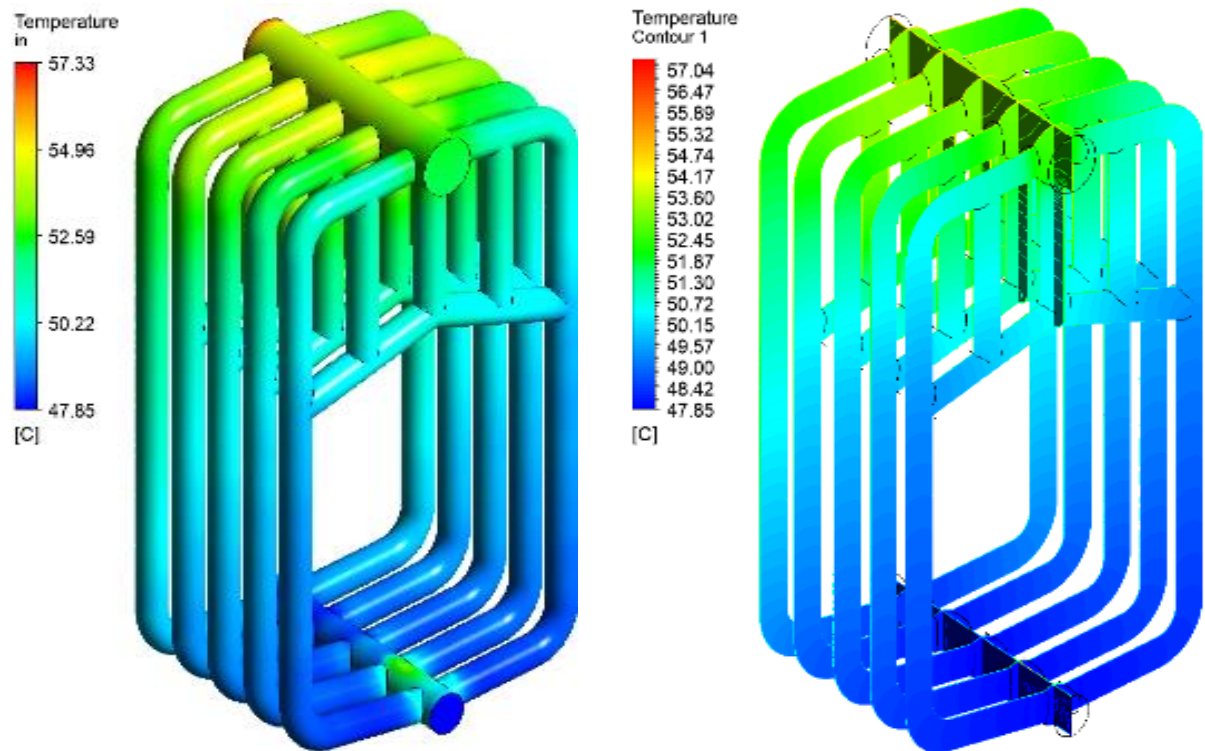
б)

Рис. 3.6 Порівняння результатів моделювання температур продуктів спалювання деревних пелет (а) з вимірним значенням у топці котла (б)

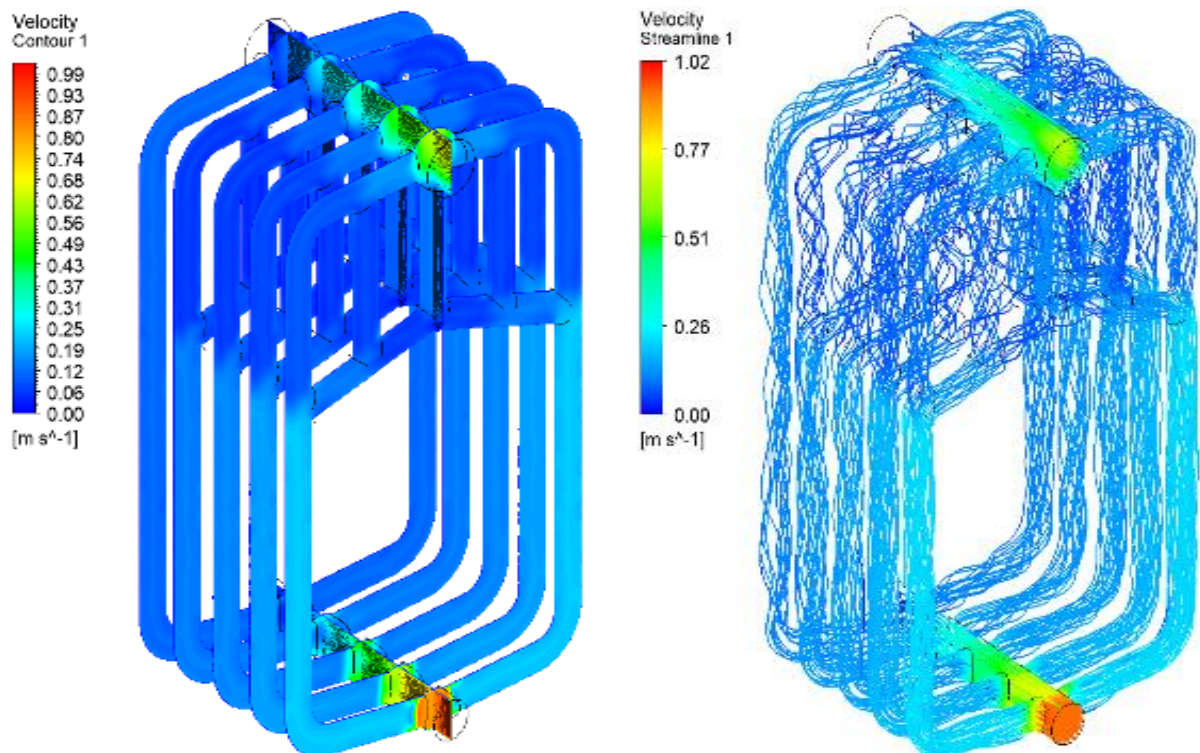
Результати моделювання теплогідралічного стану об'єкту приведені на рисунку 3.7. Як видно, топкова камера в об'ємі обмежена «водяною сорочкою». Зверху розташовується теплообмінник, конструкція якого являє собою додаткову секцію гідравлічної системи котла, що складається з оребрених труб. Така секційна конструкція котла дозволяє набирати необхідну

потужність, а збільшення площі теплообміну за рахунок теплообмінника підвищує ефективність утилізації теплоти відхідних газів. Отримані температурні градієнти показують, що температура теплоносія на виході становлять $57\text{ }^{\circ}\text{C}$, що відповідає робочому режиму опалювальної системи, а розрахунковий підігрів води у котлі не суперечить паспортним даним і не перевищує $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Швидкість циркуляції обрана з огляду на паспортні характеристики і складає 1 м/с (рисунок 3.7).

Поле температур у топковій камері приведено на рисунку 3.8. Високотемпературна зона за результатами моделювання відповідає дійсній картині розвитку факелу і утворюється примусовим обдуванням підігрітого палива на спеціально обладнаній запальним тенем платформі пальника. Значні швидкості подачі окисника на деяких режимах сприяють безпосередньому контакту високоногрітих продуктів спалювання у факелі з фронтною стінкою топкової камери. За виключенням об'ємної зони існування факелу, температурне поле у розрізі топки достатньо рівномірне з верхньою межею біля $520\text{ }^{\circ}\text{C}$. Звертають увагу досить високі значення температур у зоні виходу продуктів спалювання з топки до димоходу (більше $300\text{ }^{\circ}\text{C}$), але такі рівні температур відповідають результатам вимірювань у точці відбору проб для проведення газового аналізу, де одночасно з проведенням газового аналізу фіксувалася також температура.



a)



б)

Рис. 3.7 Температура (а) та швидкість (б) теплоносія

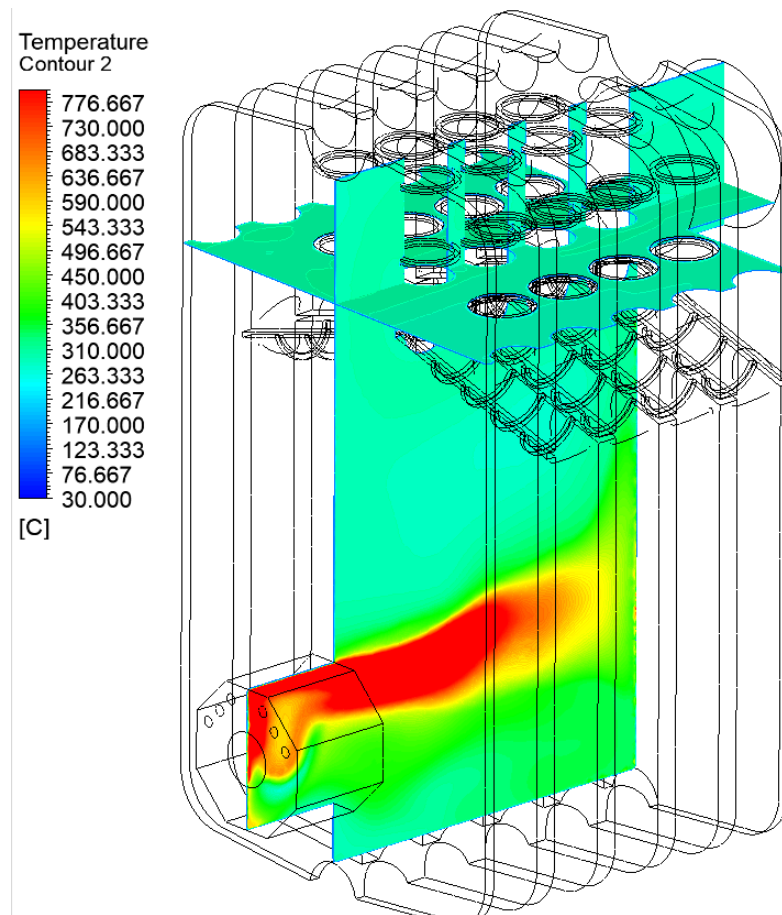


Рис. 3.8 Поле температур продуктів горіння деревних пелет

Використаний пакет прикладних програм обчислювальної гідродинаміки ANSYS-Fluent має досить широкі можливості стосовно розрахунку та візуального представлення розрахункових параметрів. На рисунку 3.9 приведений розподіл Mean Mixture Fraction, що показує межі, де вуглець і летючі переходять з твердої в газову фазу. Орієнтовно, приведені результати слід інтерпретувати як такі, що моделюють вихід твердих часток. Процес утворення незгорілих летючих твердих частинок є показовим при спалюванні твердих палив будь-якого походження і потребує контролю при експлуатації твердопаливних котлів. Очевидно, що найбільш інтенсивний процес переходу до газової фази відбувається у пальнику і в області існування факелу, але при зміні режимів горіння процес реагування вуглецю уповільнюється, займаючи при цьому майже весь об'єм топки (рисунк 3.9 а), в))

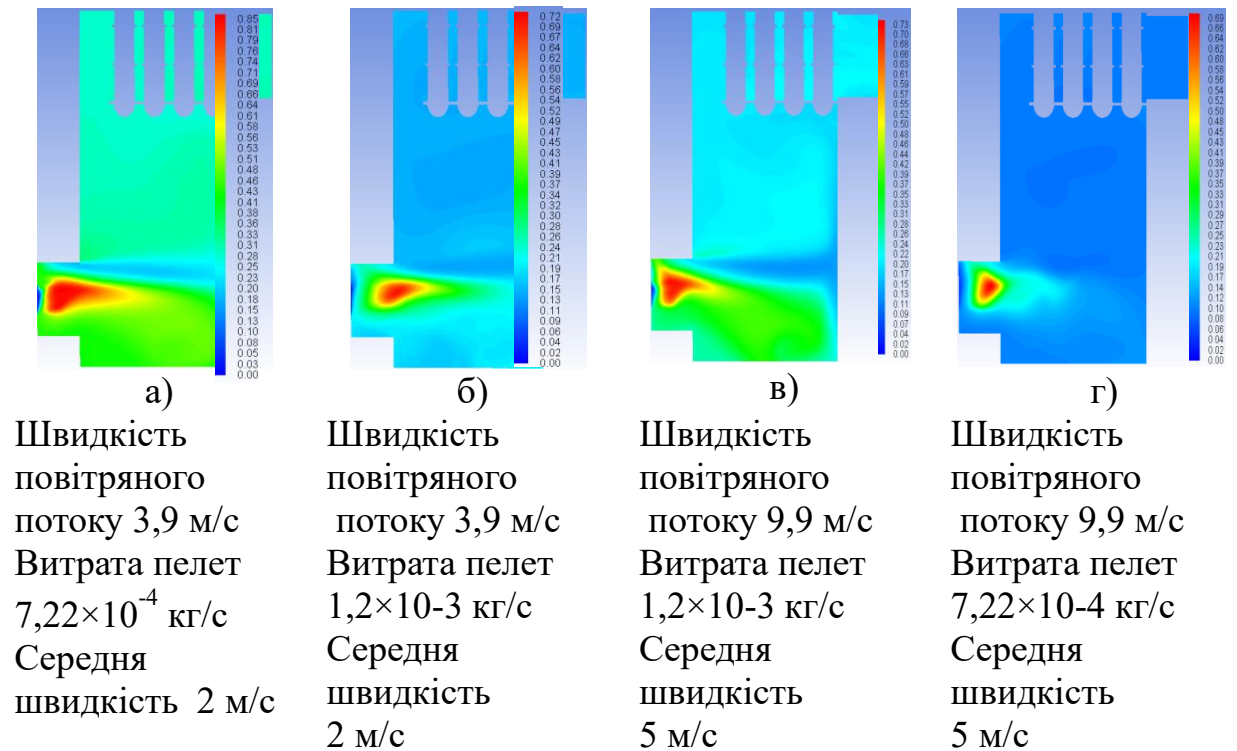
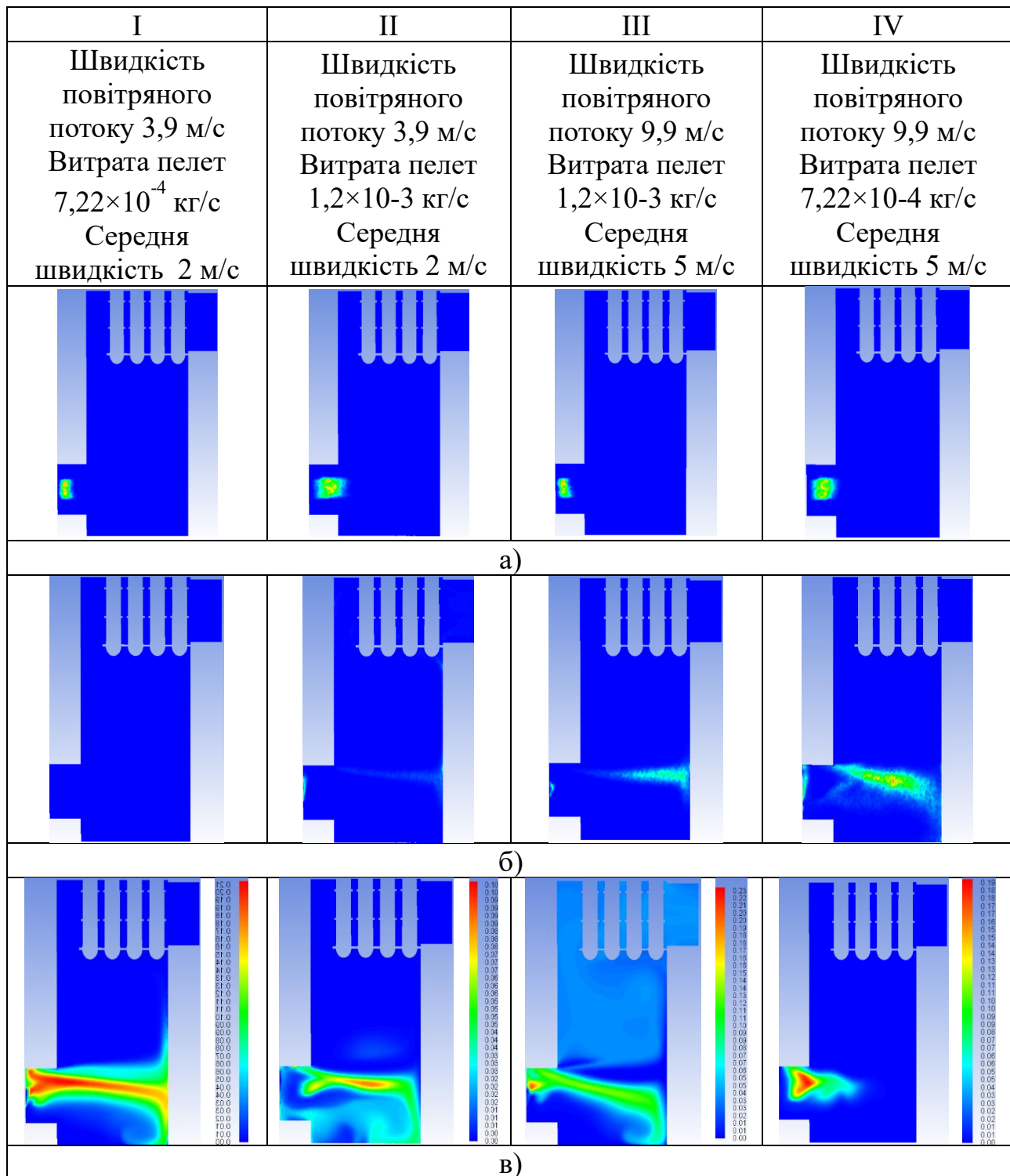


Рис. 3.9 Розподіл параметру Mean Mixture Fraction у центральному перетині топкової камери

На рисунку 3.10, а), представлені результати моделювання параметрів Evaporation/Devolatilization (DPM вихід летючих); рисунок 3.10, б) – DPM Burnout (ступінь вигорання вуглецю); рисунок 3.10, в) – розподіл масової долі компонента реакції CO, та рисунок 3.10, г) – температурні поля з лініями струмів реагуючого потоку у центральному перетині топкової камери при різних режимах горіння.

Розподіл наведених параметрів корелюється з гідродинамічною картиною потоку реагуючої суміші. На всіх представлених режимах видно, що існує розвинений факел реагуючих компонентів палива, який розвивається у горизонтальному положенні фактично відбиваючись від фронтної стінки топки і заповнює компонентами реакції як нижню подову частину, так і її загальний об'єм (рисунок 3.10, г)). При цьому, як показують розрахунки, верхня частина топкової камери до теплообмінника має більш рівномірний температурний розподіл у порівнянні з подовою частиною, де на більшості

режимів відбувається охолодження факелу холодним повітрям і проходження реакції окиснення вуглецю сповільнюється (рисунок 3.10, в)).



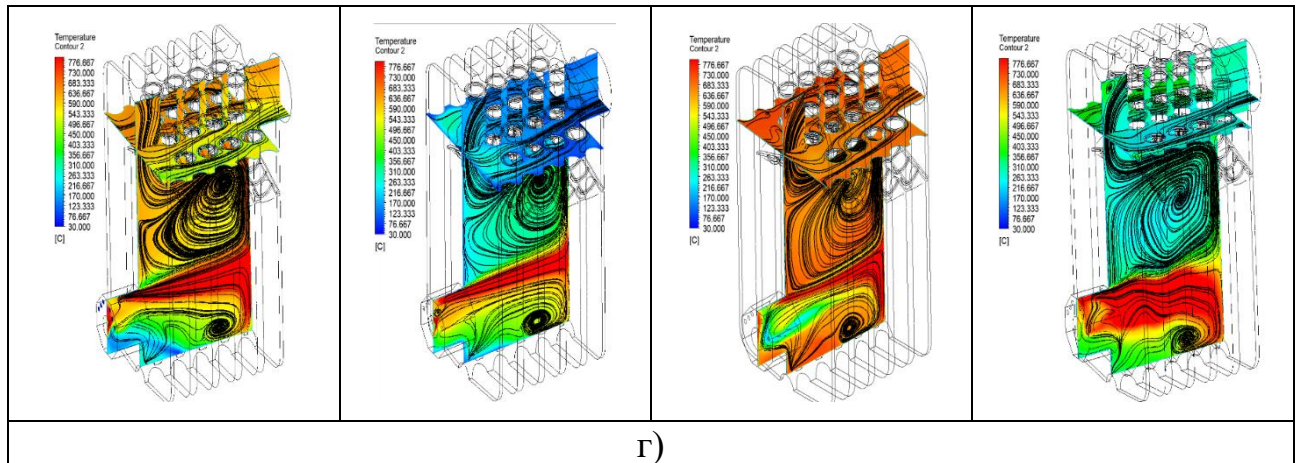


Рис. 3.10 Розподіл параметрів: вихід летючих (а), ступінь вигорання вуглецю (б), розподіл масової долі компонента реакції CO (в) та температура (г) у центральному перетині топкової камери для різних режимів навантаження установки

Найбільш інтенсивне згоряння летких речовин у CO відбувається в полум'ї та у каналі пальника. Порівняння з температурними полями на рисунку 3.10 вказує на відповідність зон високої інтенсивності горіння CO та зон з температурою >550 °C. Однак, турбулентність є ще одним фактором, який визначає остаточну картину швидкостей проходження реакції горіння. Реакції CO з CO_2 ще мають високу інтенсивність на вході в першу частину конвективного теплообмінника у зв'язку з досить високою концентрацією CO , досить високі температури для спалювання CO і підвищений рівень турбулентності, що забезпечується обтіканням ребрих труб. Слід зазначити, що у цих областях швидкість реакції горіння переважно обмежена рівнем турбулентності. Результати також показують, що одна частина повітря для горіння, що виходить з пальника і тече під полум'ям, є надлишковою для процесів горіння (утворюючи там холодні зони, які можуть обмежувати швидкість реакцій горіння, рисунок 3.10, г)).

3.5. Висновки до третього розділу

1. Проведено CFD-моделювання згорання агропелет в топковій камері автоматичного котла і пальника. Наведено результати розрахунку горіння пелет за допомогою скінчено-елементних CFD-моделей котла і пальника. Комп'ютерна модель є чутливою до теплофізичних властивостей реагуючих компонентів і кінетики реакцій, проте коректне їх задання дозволить проводити досить точну оцінку аеродинамічної структури потоку в пальниках і топці котла, в яку даний пальник встановлено, а також емісійних характеристик викидів при спалюванні біомаси.

2. За розробленою моделлю визначено характеристики роботи побутового пелетного пальника малої потужності, зокрема визначено максимальну температуру в шарі пелет, що горять, температуру газоподібних продуктів згорання, що видаляються з пальника за рахунок природної тяги, та їх хімічний склад.

3. Розроблені алгоритми чисельного дослідження та його результати можуть використовуватися при проектуванні побутових пелетних пальників малої потужності.

4. Знайдено залежність енергетичних характеристик пальника, таких як теплова потужність, температура газоподібних продуктів згорання, що виводяться з камери згорання, від його геометричних розмірів, зокрема від його довжини при сталій ширині.

5. Показано, що при зменшенні довжини пальника з 0,5 м до 0,4 м зменшується максимальна температура в шарі пелетів, що горять, зменшується температура продуктів згорання, що виводяться з пальника, та зменшується теплова потужність на 21%.

6. Знайдено, що процес горіння в меншому за довжиною пальнику протікає менш інтенсивно, ніж у довшому пальнику. На це вказує більш високий вміст кисню в газовому потоці, що виводиться з камери згорання, та менший вміст двоокису вуглецю в продуктах згорання.

РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕМІСІЇ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН ТА ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОТИ ЗГОРЯННЯ, ЗОЛЬНОСТІ ТА ВОЛОГОСТІ ПЕЛЕТ

4.1 Результати випробувань по визначенню теплоти згоряння, зольності та вологості агропелет

Для визначення характеристик солом'яних пелет, як паливної сировини, виконані дослідження теплоти їх згоряння та ряду інших важливих показників.

Як відомо, будь-яка хімічна реакція супроводжується виділенням або поглинанням теплоти. У відповідності з цим вона називається екзотермічною або ендотермічною. Хімічні реакції, що протікають в процесах горіння, переважно сильно екзотермічні. Кількість теплоти, що виділяється при повному згорянні одиниці маси даного палива залежить від того, в паровому або рідкому стані знаходиться волога в продуктах згоряння. Якщо водяна пара конденсується і вода в продуктах згоряння буде перебувати в рідкому стані, то теплота пароутворення звільниться і тоді кількість теплоти, що виділяється при згорянні одиниці маси палива, буде більшою, ніж при відсутності конденсації. При вимірюванні теплоти згоряння твердих та рідких палив, пробу палива спалюють у спеціальній ємкості – калориметричній бомбі, в атмосфері кисню при підвищеному тиску, що забезпечує повне згоряння палива. При спалюванні в калориметричній бомбі водяна пара залишається у бомбі та конденсується у ній.

Кількість теплоти, що виділяється при повному згорянні 1 кг твердого або рідкого палива, або 1 м³ газоподібного палива, за умови, що утворені водяні пари в продуктах згоряння конденсуються, називається вищою теплотою згоряння палива.

При відсутності спеціальних утилізаторів, водяні пари, що містяться в продуктах згоряння, не конденсуються і разом з ними відводяться в атмосферу. Отже, деяка частина теплоти, що виділилася при згорянні витрачається на утворення водяного пару і не може бути використана в

парогенераторі. Тому в цьому випадку теплота згоряння буде меншою тієї теплоти, що звільняється при горінні і вивільнені хімічної енергії палива.

Кількість теплоти, яке виділяється при повному згорянні 1 кг твердого або рідкого або 1 м³ газоподібного палива, за вирахуванням теплоти утворення водяної пари при горінні, називається нижчою теплотою згоряння.

При спалюванні проби палива у закритій калориметричній бомбі, паралельно з реакціями окислення проходять інші процеси – конденсація вологи, розчинення утворених при спалюванні окисів сірки та азоту у воді з утворенням кислот, які проходять з виділенням теплоти. Теплота згоряння у бомбі перевищує вищу теплоту згоряння на величину теплоти розчинення окисів. Безпосередньо у досліді визначають теплоту згоряння у бомбі, а вищу теплоту згоряння визначають розрахунковим методом, тобто шляхом введення поправок на значення теплоти розчинення окисів.

Робочий стан палива – стан палива з таким вмістом загальної вологи і зольності, з яким воно добувається, відвантажується, поставляється та використовується. При зберіганні та підготовці палива його вологість може змінюватися. Тому при вимірюванні характеристик палива необхідно вказувати його вологість. Іноді вказують до якого саме моменту з циклу використання відноситься характеристика палива, наприклад, стан поставки.

Аналітичний стан палива – стан аналітичної проби палива, вологість якого доведена до рівноважного стану з вологістю повітря в лабораторному приміщенні. Аналітичний стан палива є початковим при вимірюванні властивостей, оскільки забезпечує незмінність властивостей при підготовці проби – зважуванні, пакуванні і т.п.

Сухий стан палива – стан палива, яке не містить вологи (крім гідратної).

4.1.1 Методики вимірювань

З наданого зразка підготовлюються аналітичні проби шляхом подрібнення пелет до розміру частинок (0,1...0,3) мм та витримуються у тонкому шарі в лабораторних умовах протягом двох діб до досягнення

повітряно-сухого стану. З подрібненого та підсушеного матеріалу відбираються аналітичні проби для вимірювань теплоти згорання та зольності, а залишок використовується для визначення вологості аналітичної проби. Вологість у робочому стані (стані поставки) виміряна на наважках, відібраних безпосередньо після подрібнення пелет.

Методика визначення вологості полягає у зважуванні наважки зразка досліджуваного матеріалу, сушінні його при температурі $(105\pm 2)^\circ\text{C}$ до постійної маси та у зважуванні наважки сухого зразка. За знайденими масами вологого та абсолютно сухого зразка визначають відносну вологість.

Розрахунок вологості W проводять за формулою:

$$W = \frac{m_1}{m} \cdot 100 \quad (4.1)$$

де m_1 – зміна маси наважки зразка під час сушіння;

m – початкова маса наважки зразка.

Паралельно проводять вимірювання не менше, ніж на двох наважках зразка, а за результат приймається середнє значення двох вимірювань.

Методика відповідає вимогам ДСТУ EN 14774-2:2012 «Тверде біопаливо. Визначення вмісту вологи. Метод висушування в сушильній шафі. Частина 2. Загальна волога. Спрощений метод (EN 14774-2:2009, IDT)» та ГОСТ 27314-91 «Топливо твердое минеральное. Методы определения влаги».

Зольність зразків визначена методом повільного озолення згідно з вимогами ГОСТ 11022-95 (ИСО 1171-97) «Топливо твердое минеральное. Методы определения зольности». Тигель або човник з наважкою зразка зважують та поміщають у муфельну піч, яку протягом 60 хвилин нагрівають до 500°C і витримують при цій температурі 60 хвилин, після чого протягом 60 хвилин піднімають температуру до $(815\pm 10)^\circ\text{C}$ і витримують при цій температурі 2 години. Для різних видів традиційних палив рекомендовані різні тривалості витримки, зазвичай від 30 хвилин до 2 годин. Для випробувань пелет з соломи вибрана найбільша тривалість – 2 години. Після витримки тиглі або човники виймають з печі, охолоджують 5 хвилин на керамічній або

металевій підставці, а потім у закритому ексикаторі витримують до досягнення кімнатної температури та зважують.

Розрахунок зольності аналітичної проби проводять за формулою:

$$Z_a = 100 \times \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \quad (4.2)$$

де m_1 - маса тигля або човника;

m_2 - маса тигля з наважкою;

m_3 - маса тигля з золюю.

Паралельно проводять вимірювання не менше ніж на двох наважках зразка, а за результат приймається середнє значення двох вимірювань. Зольність при довільній робочій вологості W_p визначається за формулою:

$$Z_p = Z_a \times \frac{100 - W_p}{100 - W_a} \quad (4.3)$$

Методика визначення теплоти згорання загалом відповідає стандартним методикам для твердих видів палива ДСТУ ISO 1928:2006 «Палива тверді мінеральні. Визначення найвищої теплоти згорання методом спалювання в калориметричній бомбі та обчислення найнижчої теплоти згорання», ГОСТ 147-95 (ИСО 1928-76) «Межгосударственный стандарт. Топливо твердое минеральное. Определение высшей теплоты сгорания и вычисление низшей теплоты сгорания» та Європейському стандарту EN 14918:2009 «Solid Biofuels - Method for the determination of calorific value». Значення вмісту сірки, водню та азоту для визначення поправок при обробці експериментальних даних використовувалися такі, як рекомендовано ГОСТ 147-95 та у додатку Н EN 14918:2009. Середній вміст сірки прийнятий 0,1 %, вміст водню на суху масу пелет з соломи прийнятий 6,3 %. Поправка на утворення азотної кислоти прийнята така, що визначена при градуюванні калориметра.

Згідно вказаних стандартів проводять щонайменше два досліді вимірювання теплоти згорання і якщо розбіжність результатів дослідів

перевищує заданий рівень, проводять третій дослід, а за результат приймають середнє по двом найближчим вимірюванням. За результатом вимірювання теплоти згоряння в бомбі розраховують вищу та нижчу теплоту згоряння згідно з ГОСТ 147-95 та ДСТУ ISO 1928.

Зольність та теплота згоряння для сухого стану та для робочого стану при вологості за визначеної вологості у стані поставки W_p розраховані на підставі експериментальних даних для аналітичної вологості.

4.1.2. Прилади та апаратура

Теплоту згоряння зразків досліджено за допомогою калориметра для вимірювання теплоти згоряння палива моделі КТС-4 зав. №01 (свідоцтво про МА ДП Укрметртестстандарт №24.652.2010 від 28.12.2010 р.), до складу якого входить калориметрична бомба БКУ-2 №11 (атестат №24-2/5461).

Масу зразків, запального дроту та паперової упаковки визначено за допомогою ваг ВЛР-20 зав. №727.

При визначенні зольності та вологості зразків використовувалися ваги А500 фірми AXIS, зав. № 6902, шафа сушильна лабораторна СНОЛ-3,5 та піч муфельна.

Для визначення теплоти згоряння палив та хімічних речовин традиційно використовують ентальпійні водяні бомбові калориметри, однак в останні роки для таких вимірювань набувають розповсюдження калориметри теплового потоку, або кондуктивні калориметри. Калориметри теплового потоку марки КТС містять в собі калориметричну чутливу оболонку, вмонтовану в термостатований блок, і розташовану в ній комірку з реакційною посудиною – калориметричною бомбою. Вихід калориметричної оболонки з'єднаний із входом вимірювально-обчислювальної системи, яка вимірює та обробляє сигнали. Прилад має вентилятор, який обдуває зовнішню поверхню калориметричного блоку для охолодження, а електричний нагрівач, розміщений на поверхні калориметричного блоку, служить виконавчим елементом системи терморегулювання, яка за сигналом перетворювача

температури регулює електричну потужність нагрівача так, щоб підтримувати постійною температуру калориметричного блоку. При вимірюваннях в калориметричній бомбі розміщують зразок досліджуваного матеріалу та заповнюють її киснем, встановлюють бомбу в комірку, а після стабілізації температури в калориметрі підпалюють зразок. Теплота, що виникає внаслідок згоряння зразка, проходить через калориметричну чутливу оболонку, внаслідок чого оболонка генерує сигнал, пропорційний тепловому потоку, який надходить на вимірювально-обчислювальну систему, що здійснює його вимірювання та інтегрування сигналу. Інтегральне значення сигналу від моменту підпалу зразка до моменту повторної стабілізації температури в калориметрі пропорційне кількості теплоти, що виділилася в реакційній посудині.

Калориметри теплового потоку порівняно з традиційними водяними ентальпійними, мають декілька переваг – вони не потребують кондиціонування і точного зважування води, легко автоматизуються, не потребують спеціальних приміщень для експлуатації. Але такі прилади мають і недоліки - неконтрольовані зміни температури і швидкості повітря, яке обдуває калориметричний блок, і інші зовнішні збурення приводять до змін сигналу калориметричної оболонки, внаслідок чого збільшується похибка вимірювань.

Добре відомий спосіб боротьби зі впливом зовнішніх збурень у кондуктивних калориметрах – це використання диференційної схеми підключення чутливих елементів. Така схема підходить здебільшого для мікрокалориметрів, оскільки для неї характерна обмеженість верхньої границі вимірюваної теплової потужності внаслідок того, що система термостатування теплоізовованого масивного блоку не здатна відводити значну кількість теплоти, що виділяється в реакційній посудині. Крім того, наявність двох однакових комірок призводить до збільшення габаритів та маси пристрою. Ці недоліки особливо наглядно проявляються при спробі створення диференційного бомбового калориметра за класичною схемою при використанні бомб, що за розмірами відповідають вимогам діючих стандартів

до маси проб палив. Для розв'язання зазначених протиріч запропонований квазідиференціальний калориметр, що має дві комірки – основну робочу з необхідними розмірами, та комірку порівняння значно меншої висоти.

Загальна структура калориметра показана на рисунку 4.1.

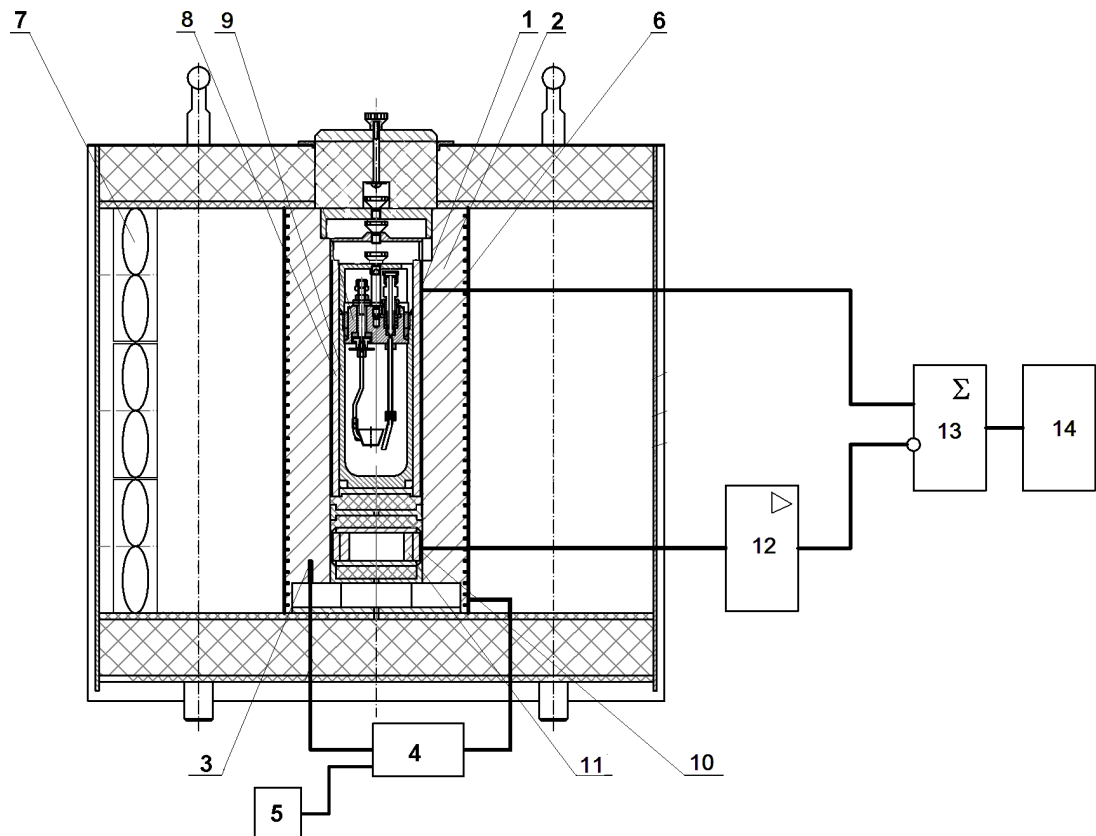


Рис. 4.1 Загальна структура квазідиференціального бомбового калориметра

Тепловий блок приладу має калориметричну чутливу оболонку 1, яка вмонтована в термостатований блок 2. Система термостатування блоку 2 складається з вмонтованого у блок перетворювача 3 температури, електронного терморегулятора 4 з задавачем значення температури 5. Виконавчими елементами системи термостатування є електричний нагрівник 6, що розташований на зовнішній поверхні блоку 2 і який підключений до виходу регулятора 5, та блок вентиляторів 7, який утворює потік охолоджувального повітря в каналі, що оточує блок 2. В калориметричній оболонці 1 розташована комірка 8 та калориметрична бомба 9, що складається

зі стакану та кришки з вентилями. Під основною калориметричною оболонкою 1, співвісно з нею розташована додаткова компенсаційна оболонка 10, яка має той же самий діаметр, конструкцію та щільність термоелементів, що й в основній оболонці, а висоту – приблизно у 10 разів меншу. У компенсаційній оболонці 10 розміщено імітатор 11 комірки та реакційної посудини, що має питому теплоємність на одиницю площі поверхні оболонки таку ж саму, як і вміст основної оболонки. Імітатор комірки і реакційної посудини виконаний складеним з двох або більшої кількості частин. Причому між цими частинами, що складають імітатор, розташовані регульовані теплові опори. Така конструкція дозволяє шляхом підбору теплових опорів між частинами імітатору при настроюванні калориметра отримувати таку ж саму динаміку зміни сигналу компенсаційної оболонки при впливі зовнішнього збурення, як і динаміка зміни сигналу основної оболонки при впливі того ж збурення.

Вихід компенсаційної оболонки 10 з'єднаний зі входом підсилювача 12, вихід якого з'єднаний з інвертувальним входом суматора 13, до неінвертувального входу якого приєднаний вихід основної калориметричної оболонки 2. Вихід суматора 13 з'єднаний зі входом вимірювально-обчислювальної системи 14.

Між основною калориметричною оболонкою 1 та компенсаційною оболонкою 16 розташовано тепловий екран з високотеплопровідного матеріалу, який має тепловий контакт з термостатованим блоком 2. Така конструкція забезпечує теплову розв'язку між основною та компенсаційною калориметричними оболонками. Теплові ефекти, що виникають в реакційній посудині в основній калориметричній оболонці, безпосередньо не впливають на сигнал компенсаційної оболонки.

На етапі настроювання пристрою нагрівають блок до заданої температури і починають реєструвати сигнали калориметричних оболонок, а також сигнали на виходах підсилювача та суматора. Після встановлення стаціонарного режиму задавачем температури задають режим зміни температури термостатованого блоку від першого усталеного значення до

іншого, що відрізняється на 2...10 К та реєструють вказані сигнали у перехідному процесі. На рисунку 4.2 а та 4.2 б представлені графіки зміни в часі вказаних сигналів. Зміні температури корпусу відповідає крива 1, сигнал основної калориметричної оболонки представлений кривою 2, а компенсаційної – кривою 3, а сигнали на виходах підсилювача та суматора – відповідно, кривими 4 та 5.

Після закінчення перехідного процесу регулюванням теплових опорів у складеному імітаторі комірки і реакційної посудини змінюють сталі часу вихідного сигналу компенсаційної оболонки так, щоб вони наблизились до сталих часу вихідного сигналу основної калориметричної оболонки.

Встановлюють значення K коефіцієнту підсилення підсилювача, яке визначають на підставі зареєстрованих значень сигналів калориметричних оболонок за розрахунковою формулою:

$$K = \frac{\int_0^{\tau_n} E_{oo} d\tau}{\int_0^{\tau_n} E_{ко} d\tau} \quad (4.4)$$

де E_{oo} і $E_{ко}$ – сигнали основної та компенсаційної оболонки, які виміряні протягом перехідного процесу.

Перевіряють результати настроювання, задаючи знову режим зміни температури термостатованого блоку та проводячи реєстрацію сигналів у перехідному процесі, як це показано на рис. 4.2 б, де крива 6 – сигнал основної калориметричної оболонки; 7 – сигнал компенсаційної оболонки; 8 – сигнал на виході підсилювача; 9 – сигнал на виході суматора. Внаслідок проведеного регулювання – вирівнювання сталих часу та встановлення коефіцієнта підсилення – зміна сигналу 8 на виході підсилювача близька до зміни сигналу 6 основної калориметричної оболонки, а зміна сигналу 9 на виході суматора значно менша, ніж відповідна зміна цього сигналу до настроювання (поз. 5 на рисунку 4.2 б). Тобто вихідний сигнал стає малочутливим до зовнішніх збурень.

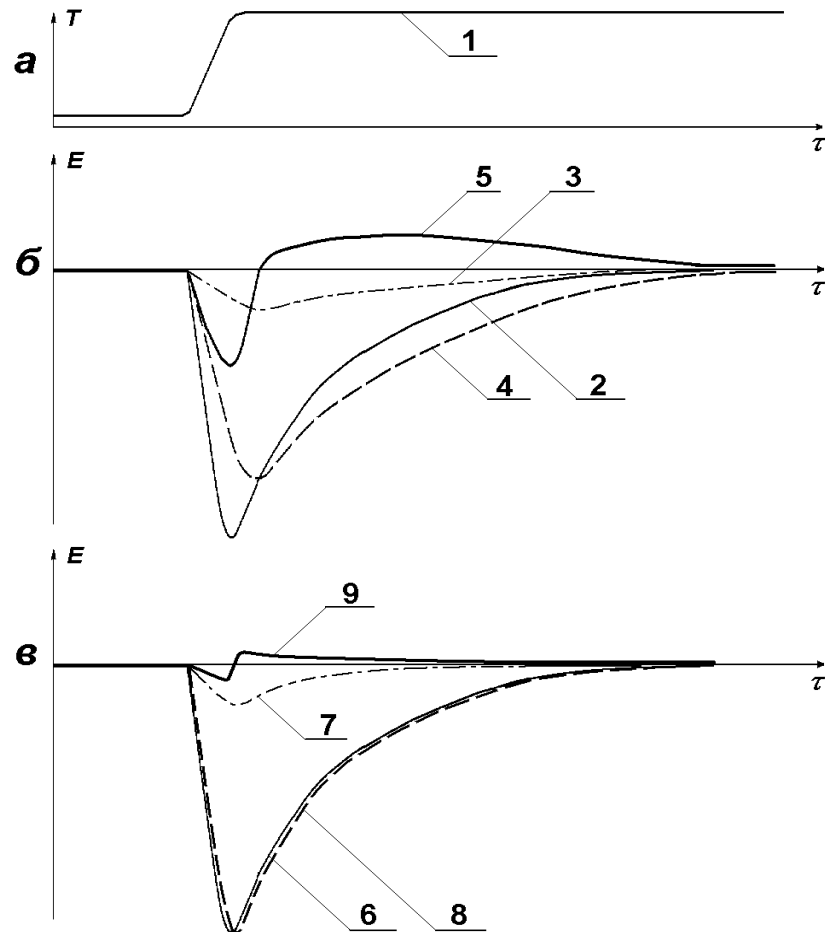


Рис. 4.2 Графіки змінення сигналів під час настроювання: а – змінення температури корпусу; б – змінення сигналів до регулювання; в – змінення сигналів після регулювання.

В ІТТФ НАНУ розроблений та виготовлений калориметр КТС-4 [74], який реалізує розглянутий вище принцип квазідиференціального калориметру теплового потоку. До складу приладу, окрім згаданих теплового та електронного блоків, входять дві калориметричні бомби БКУ-2 та сервісне обладнання. Загальний вигляд приладу показаний на рисунку 4.3. Прилад пройшов метрологічну атестацію в ДП «Укрметртестстандарт».

Калориметр має такі основні технічні характеристики:

- діапазон вимірювання кількості теплоти – від 10 до 35 кДж;
- похибка вимірювань – не більше $\pm 0,1\%$;
- споживана потужність – не більше 1,0 кВА;
- загальна маса теплового та електронного блоків - не більше 70 кг.



Рис. 4.3 Загальний вигляд калориметра КТС-4

Створений калориметр для визначення теплоти згоряння КТС-4 по метрологічним характеристикам не поступається закордонним робочим засобам вимірювання.

4.1.3 Результати вимірювань

Результати визначення робочої вологості (у стані поставки) та аналітичної вологості проб наведені в таблиці 4.1.

Результати вимірювання зольності аналітичної проби та розрахунків зольності у сухому і робочому стані представлені в таблиці 4.2.

При визначенні теплоти згоряння проби спалювалися в упаковці з паперу, яка була попередньо зважена.

Проведено два досліди спалювання аналітичних проб.

Результати вимірювань та розрахунків наведені в таблиці 4.3.

Питома теплота згоряння палива в бомбі розраховується за формулою:

$$q_b = [Q_{\text{п}} - m_{\text{уп}} \cdot q_{\text{уп}} - q_{\text{др}}(m_1 - m_2)] / m_3, \quad (4.5)$$

де $Q_{\text{п}}$ - загальна теплота, що виділилася при спалюванні проби за показами приладу;

$q_{др} = 2510$ Дж/г - питома теплота згоряння запального дроту;

$q_{уп} = 15627$ Дж/г - питома теплота згоряння упаковки;

m_1, m_2 – маси дроту до та після спалювання; m_3 – маса проби; $m_{уп}$ – маса упаковки

Таблиця 4.1. Результати вимірювань та розрахунків

Параметри, які вимірюються та розраховуються	Результати вимірювань та розрахунків			
	Робоча (у стані поставки)		В аналітичному стані	
	Наважка 1	Наважка 2	Наважка 1	Наважка 2
Маса пустої бюкси, г	159,84	154,15	164,43	156,86
Початкова маса бюкси з наважкою, г	166,77	161,64	171,49	163,34
Маса бюкси з висушеною наважкою, г	166,15	160,96	170,86	162,77
Вологість проби у досліді W_i , %	8,95	9,08	8,92	8,80
Середня вологість проби W , %	9,0		8,9	

Середнє значення теплоти згоряння аналітичних проб у бомбі розраховано як середнє за результатами двох вимірювань.

Таблиця 4.2. Параметри зольності

Параметр	Значення зольності, %
Зольність аналітичної проби, %	4,37
Зольність у сухому стані, %	4,79
Зольність у робочому стані, %	4,36

Таблиця 4.3. Результати вимірювань

п/п	Результати вимірювань				Результати обчислень	
	Визначення маси				Покази приладу, Q_p , Дж	Виміряна теплота згоряння в бомбі, q_b , кДж/кг
	Проби палива m_3 , г	Паперової упаковки $m_{\text{папір}}$, г	Дроту до згоряння m_1 , г	Залишку дроту, що не згорів, m_2 , г		
	0,39005	0,10125	0,01281	0,00536	8179	16865
	0,45361	0,10907	0,01344	0,00465	9366	16842
	Середнє значення q_b , кДж/кг					16853

Середнє значення теплоти згоряння у бомбі пелет з соломи пшениці в аналітичному стані складає 16853 кДж/кг.

4.1.4 Розрахунок вищої та нижчої теплоти згоряння

Вища теплота згоряння аналітичної проби з врахуванням поправок на створення та розчинення кислот розрахована за формулою:

$$q^a_v = q_b - (94 \cdot S + \alpha \cdot q_b) \quad (4.2)$$

де 94 – коефіцієнт, що враховує теплоту утворення сірчаної кислоти з діоксиду сірки та розчинення сірчаної кислоти у воді на 1% сірки, що перейшла при згорянні палива в сірчану кислоту, кДж/кг;

S – масова доля сірки в паливі, %;

$\alpha \cdot q_6$ - поправка, що враховує теплоту утворення та розчинення в воді азотної кислоти, прийнято $\alpha \cdot q_6 = 29 \text{ кДж/кг}$.

Вміст сірки S_c прийнятий 0,1% на суху масу, як рекомендовано EN 14918:2009, а вміст водню $H_c = 6,3 \%$ на суху масу. При вологості W_a , вміст сірки та водню розраховується за формулами:

$$S_a = S_c \times \frac{100 - W_a}{100}, \quad H_a = H_c \times \frac{100 - W_a}{100}. \quad (4.3)$$

Нижча теплота згоряння аналітичної проби розраховується за формулою:

$$q_H^a = q_B^a - 24,42 \cdot (8,94 \cdot H_a + W_a) \quad (\text{кДж/кг}) \quad (4.4)$$

В абсолютно сухому стані вища теплота згоряння складає:

$$q_{\hat{A}}^C = q_{\hat{A}}^a \times \frac{100}{100 - W_a} \quad (4.5)$$

В абсолютно сухому стані нижча теплота згоряння складає:

$$q_{\hat{I}}^c = q_{\hat{A}}^c - 24,42 \cdot 8,94 \cdot \hat{I}_c \quad (4.6)$$

При довільній робочій вологості w_p , розрахунки проводяться за формулами:

$$\text{- вища теплота згоряння: } q_B^P = q_B^C \times \frac{100 - W_P}{100}, \quad \text{кДж/кг} \quad (4.7)$$

$$\text{- вміст водню: } H_D = H_C \times \frac{100 - W_D}{100} \quad (4.8)$$

$$\text{- нижча теплота згоряння: } q_{\hat{I}}^P = q_{\hat{A}}^P - 24,42 \cdot (8,94 \cdot \hat{I}_P + W_P), \quad (\text{кДж/кг}) \quad (4.9)$$

В таблиці 4.4 наведені результати розрахунків вмісту водню в аналітичній пробі, вищої та нижчої теплоти згоряння аналітичної проби, абсолютно сухого палива та зразка у стані поставки згідно формул (4.2)...(4.9).

Узагальнені результати вимірювань та розрахунків властивостей зразків пелет з соломи пшениці у аналітичному повітряно-сухому стані (in air dry), у сухому стані (dry basis) та у робочому стані наведені в таблиці 4.5.

Таблиця 4.4. Теплота згоряння

Зразок	Вологість аналіт. проби W_a , %	Вміст водню в аналіт. пробі H_a , %	Теплота згоряння в бомбі, q_b , кДж/кг	Теплота згоряння					
				Аналітична проба		У сухому стані		У робочому стані (поставки)	
				Вища q_v^a , кДж/кг	Нижча q_n^a , кДж/кг	Вища q_v^c , кДж/кг	Нижча q_n^c , кДж/кг	Вища q_v^p , кДж/кг	Нижча q_n^p , кДж/кг
Пелети соломи пшениці	8,9	5,73	16853	16816	15346	18450	17075	16787	15316

Таблиця 4.5. Результати вимірювань та розрахунків властивостей зразків пелет з соломи пшениці

Характеристика соломи пшениці		
Вологість аналітичної проби, %		8,9
Вологість у робочому стані (поставка), %		9,0
Зольність аналітичної проби, %		4,37
Зольність у сухому стані, %		4,79
Зольність у робочому стані (поставка), %		4,36
<i>Теплота згоряння</i>		МДж/кг
Вища теплота згоряння аналітичної проби		16,82
Вища теплота згоряння у сухому стані		18,45
Вища теплота згоряння у робочому стані (поставка)		16,79
Нижча теплота згоряння аналітичної проби		15,35
Нижча теплота згоряння у сухому стані		17,07
Нижча теплота згоряння у робочому стані (поставка)		15,32

4.2. Аналіз хімічного складу димових газів в котлі при роботі пелетного пальника

Аналіз хімічного складу димових газів в котлі при роботі пелетного пальника проводиться під час досліджень процесу спалювання пелет з деревини. Залежності температури від часу в характерних точках простору котла для цього випадку наведено на рисунках 4.4...4.6. Для проведення аналізу складу димових газів, в тракці їх видалення, що виходить з котла, передбачено спеціальне віконце, в яке вводиться датчик газоаналізатора. Віконце знаходиться на висоті 0,5 м відносно вхідного перерізу димовивідного тракту.

Хімічний склад димових газів визначається за допомогою газоаналізатора TESTO 330-2LL. За його допомогою визначається температура димових газів в точці вимірювання, а також концентрація кисню (O_2), двоокису вуглецю (CO_2), моноокису вуглецю (CO), окисли азоту (NO_x) та деякі інші параметри.

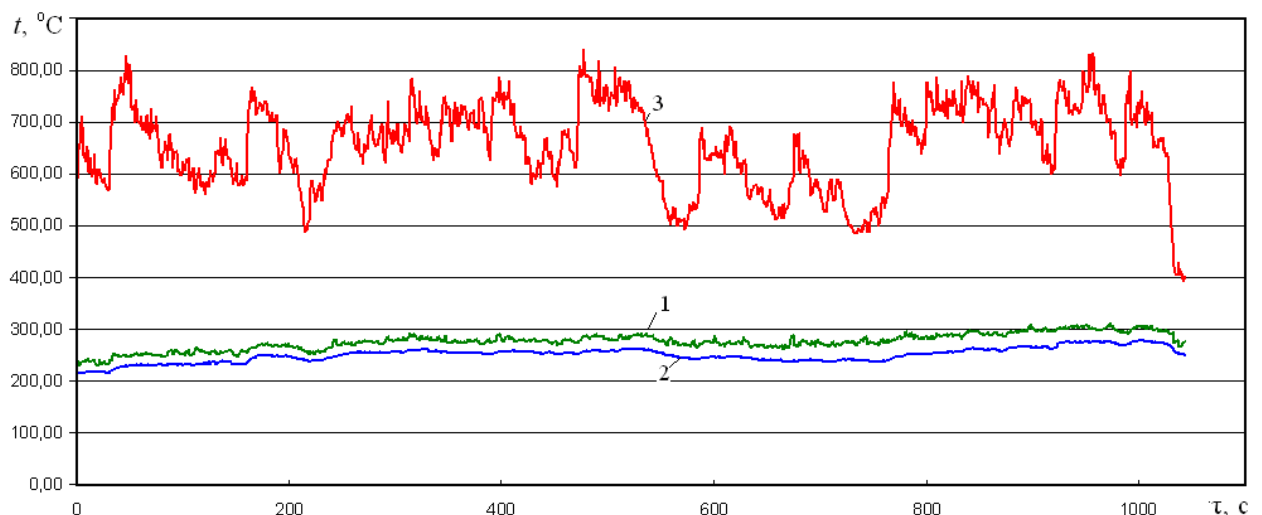


Рис. 4.4 Зміна у часі температурного стану котла на стадії квазістаціонарного режиму горіння пелет з деревини при максимальній подачі палива з бункера (другий варіант): 1 – показання термопари 4.1; 2 – 4.4; 3 – 4.8

Датчик газоаналізатора через певні проміжки часу вводиться в віконце у тракці видалення димових газів. Результати виміру концентрацій окремих

складових димових газів записуються на паперову стрічку та в пам'ять газоаналізатора.

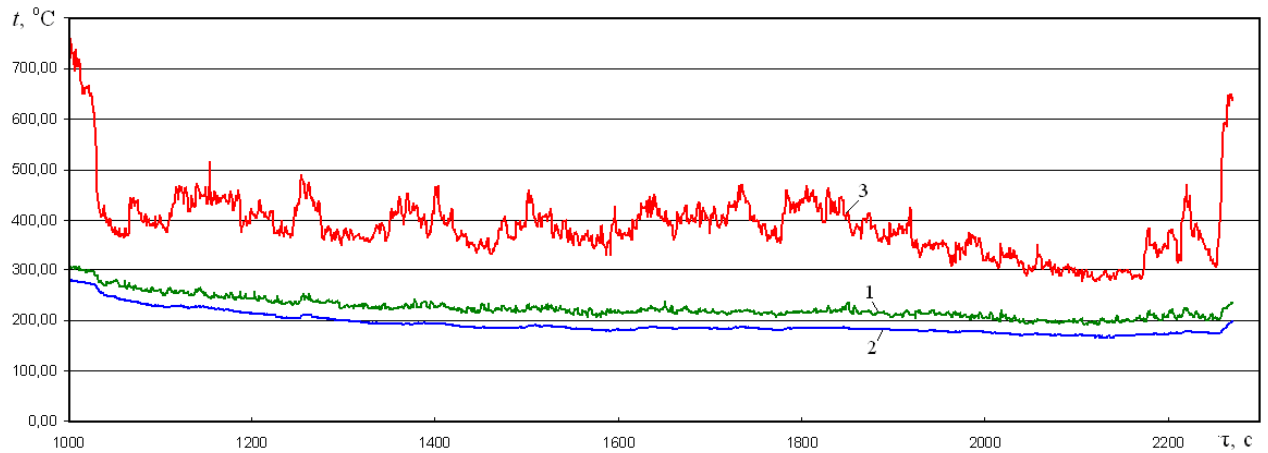


Рис. 4.5 Зміна у часі температурного стану котла на стадії квазістаціонарного режиму горіння пелет з деревини при мінімальній подачі палива з бункера (другий варіант): 1 – показання термопар 4.1; 2 – 4.4; 3 – 4.8

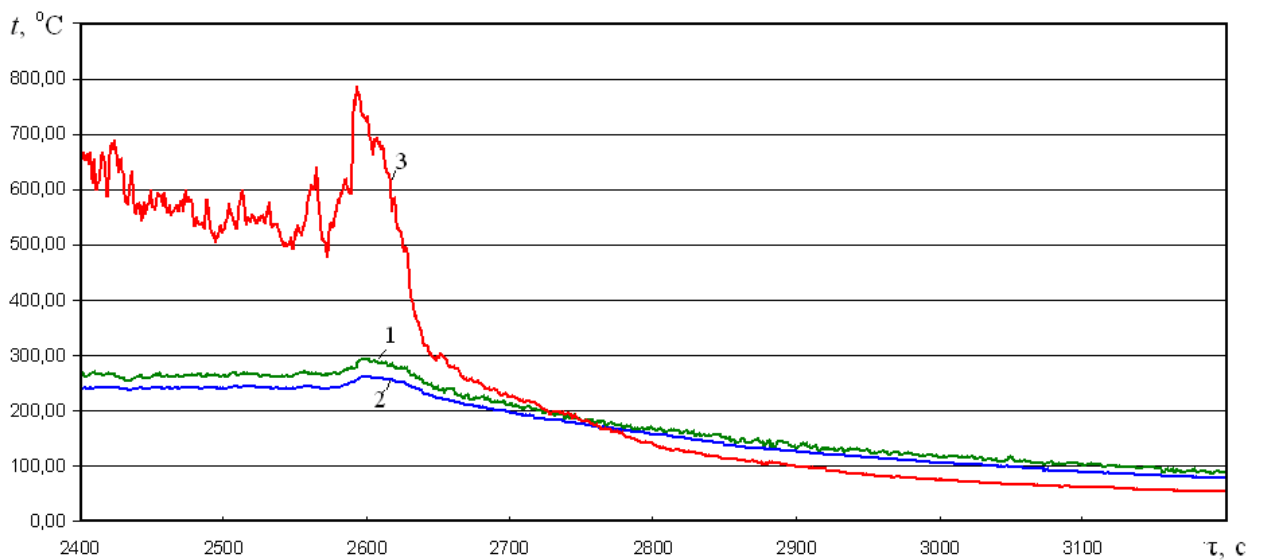


Рис. 4.6 Зміна у часі температурного режиму в котлі на стадії завершення горіння пелет з деревини (другий варіант): 1 – показання термопар 4.1; 2 – 4.6; 3 – 4.8.

Залежність від часу температури димових газу в тракці їх видалення на ділянці, де проводиться вимірювання, наведено на рисунку 4.7 (крива 1). На цьому ж рисунку для порівняння наведено також залежність температури, що вимірюється в точці 4.1 котла ХА термопарою.

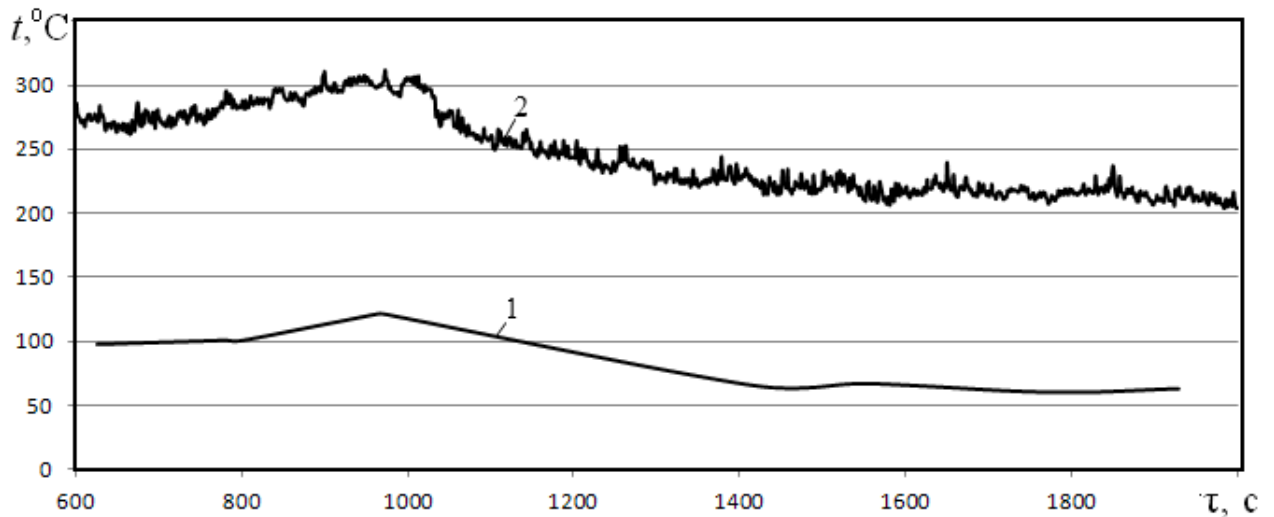


Рис. 4.7 Зміна у часі температури димових газів у віконці для газоаналізатора (1) та в точці 4.2.

Як видно з цього рисунку, температура димових газів у віконці для газоаналізатора синхронно змінюється з температурою в точці 4.1 котла. Температура на цій ділянці тракту для видалення димових газів на 150...170 °C нижча, ніж в точці 4.1 котла і змінюється у межах 60 °C ...121 °C. Їх охолодження відносно температури в точці 4.1 відбувається внаслідок тепловіддачі від газів до теплообмінника системи опалення, що встановлено в котлі, а також внаслідок тепловтрат у простір приміщення.

4.3 Дослідження емісії забруднюючих речовин при спалюванні пелет

Виконання газового аналізу проводилося при спалюванні деревних пелет. Відбір продуктів спалювання виконувався у димоході відразу після котла. Після досягнення усталених режимів роботи, концентрації CO, NOx

виражені на сухій основі вимірювались за допомогою газоаналізатора TESTO типу 330-1 LL (рисунок 4.8) [75].



Рис. 4.8 Газоаналізатор для вимірювання забруднюючих речовин

У результаті отримано концентрації NO_x та CO відповідної температури у місці забору проб. Зміна у часі концентрації цих речовин у димових газах відображена на рисунку 4.9.

Значення концентрацій оксидів азоту слід вважати помірними, чого не можна стверджувати стосовно концентрації монооксиду вуглецю. Така картина характерна для процесу низькотемпературного горіння з наявністю значного хімічного недопалу. Встановлено, що досить суттєва концентрація CO виникає у перехідних фазах подачі палива, його розпалу та згасання. Максимуми концентрацій відповідають перехідним процесам між розпалом та процесом усталеного горіння. У цілому, концентрації CO як основної складової хімічного недопалу мають завищений рівень і потребують подальшого корегування шляхом налагодження робочих режимів пальникової системи та, по можливості, впровадження додаткових конструктивних заходів.

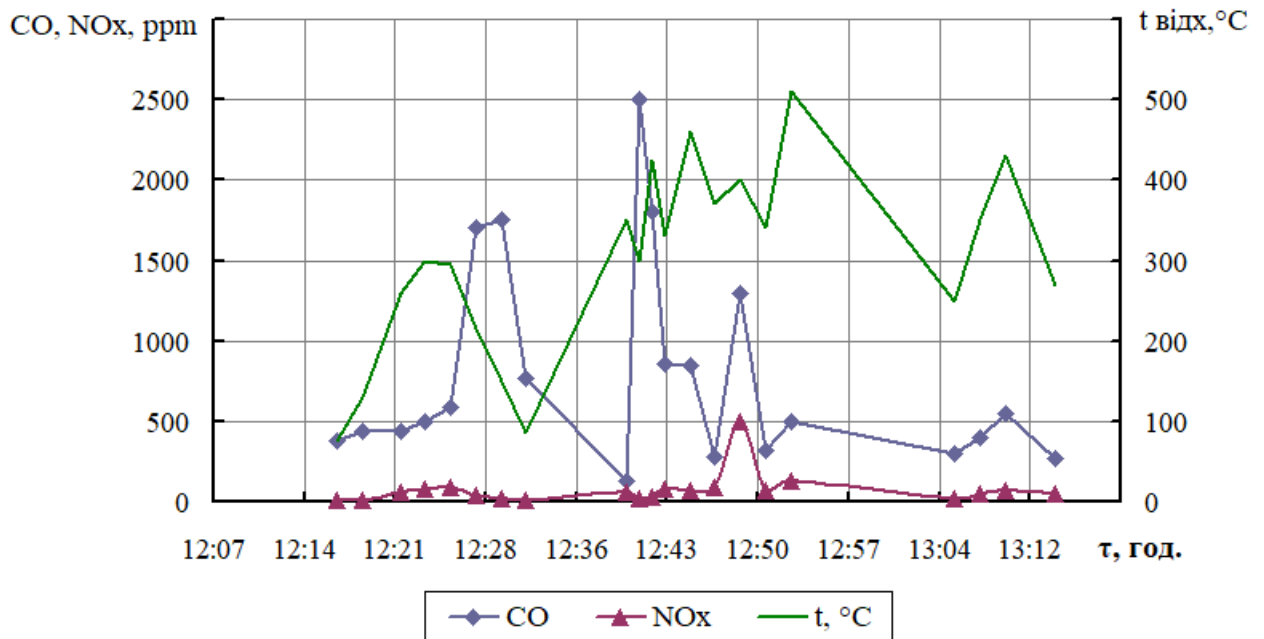


Рис. 4.9 Концентрації NOx та CO у відхідних газах при спалюванні деревних пелет

Слід зазначити, що зменшення викидів CO через неповне згорання може бути досягнуто шляхом подовження часу перебування продуктів спалювання (особливо в частинах з достатньо високою температурою > 550 °C), шляхом додаткової турбулізації потоку, або шляхом досягнення вищих температур продуктів спалювання в окремих частинах водогрійного котла. Оскільки час перебування продуктів визначається швидкістю подачі палива і конструкцією топкової камери, на нього майже не можливо істотно вплинути. Одним з варіантів вирішення поставленої задачі можуть бути запропоновані заходи, які викликають локальне збільшення турбулентності потоку або підвищення температури димових газів. Як варіант, нескладна технічна модернізація топки із застосуванням турбулізатора горіння, розташованого на межі топкової камери і конвективної частини запропонована авторами [76] (рисунок 4.10). Запропоноване місце розташування знаходиться в області досить високих температур, щоб потенційно підтримувати відносно інтенсивну швидкість горіння CO.

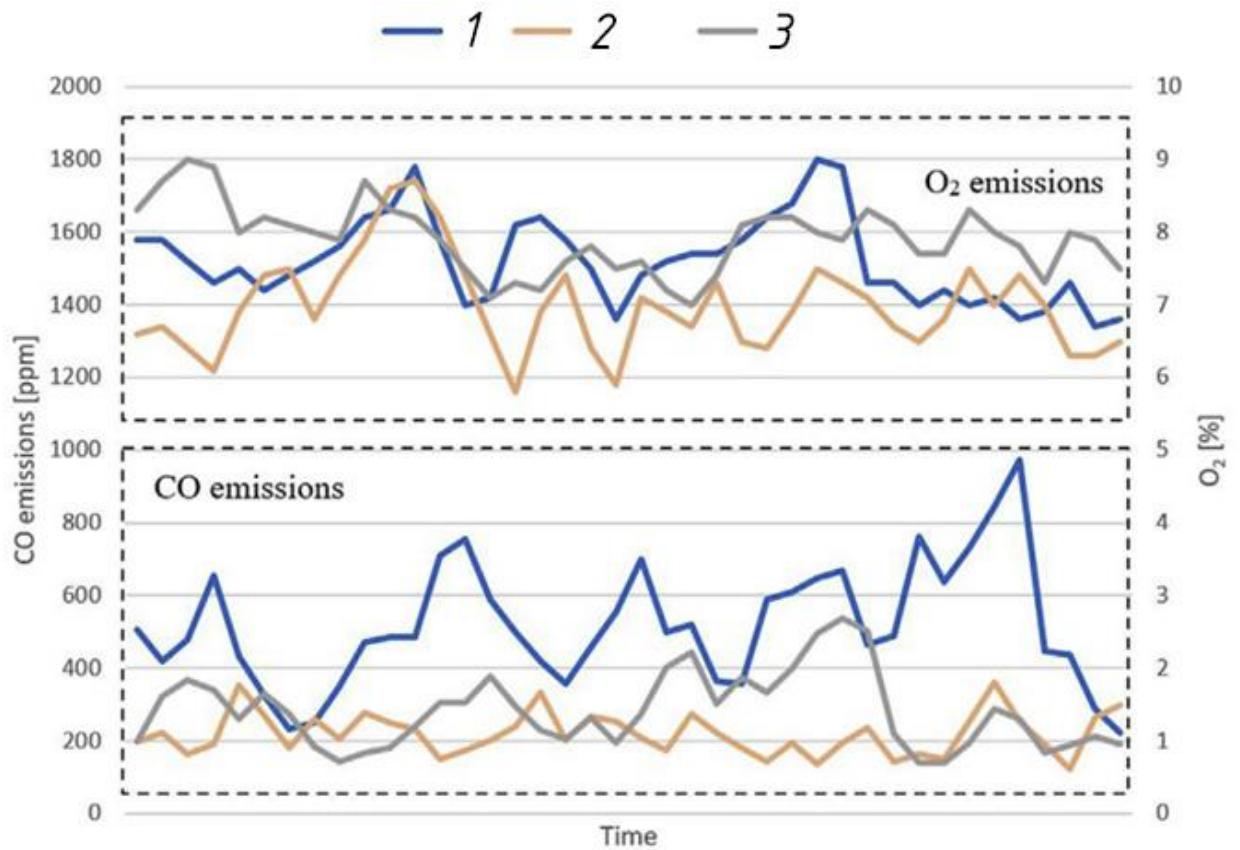


Рис. 4.10 Концентрації CO та O_2 у відхідних газах при спалюванні агропалива (1) при застосуванні решіткових турбулезаторів горіння сотової форми (2) та турбулезаторів V-подібної форми (3)

Вкрай важливо досліджувати і виявляти оптимальні режимні карти спалювання пелет в залежності від повноти їх спалювання; викидів шкідливих газів (NO_x); структури золи, температури теплоносія. Необхідно комплексно досліджувати склад та концентрації компонентів відхідних газів, а також можливих режимів, при яких виникає конденсація парів води.

4.4. Висновки до четвертого розділу

1. Досліджено емісію забруднюючих речовин при спалюванні пелет.
2. За результатами експериментальних досліджень визначено теплоту згоряння, вологість та зольність пелет з соломи пшениці. Визначено також температуру розм'якшення золи, що утворюється після спалювання пелет з соломи, та температуру її плавлення.
3. Проведені дослідження щодо впливу загального коефіцієнту надлишку повітря на емісію оксиду вуглецю та оксидів азоту при спалюванні в експериментальному пальнику паливного подрібненого палива з вмістом води 15%.
4. Досліджена емісія CO та NO_x при спалюванні подрібненого палива в пальнику з постійним загальним надлишком повітря та змінною часткою вторинного повітря, які дозволили виявити режими спалювання, що прийнятні для реалізації в промисловому обладнанні різної потужності.
5. Вкрай важливо в подальшому дослідити і виявити оптимальні режимні карти спалювання в залежності від повноти спалювання; викидів шкідливих газів (NO_x); структури золи, температури теплоносія.
6. Необхідно комплексно досліджувати склад та концентрації компонент відхідних димових газів, а також випадків режимів конденсації парів води.

РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ВИГОТОВЛЕННЯ ПАЛЬНИКІВ ДЛЯ СПАЛЮВАННЯ АГРОПЕЛЕТ В КОТЛАХ ПОБУТОВИХ СПОЖИВАЧІВ

5.1 Рекомендації вдосконалення конструкційних характеристик пелетного пальника

Головна проблема спалювання пелет з соломи злакових культур полягає у відносно низькій температурі розм'якшення та розплавлення золи, яка утворюється в процесі горіння пелет цього виду. У випадку спалювання пелет з деревини ця проблема не стоїть так гостро. Зольність пелет з деревини – нижча, ніж у пелет з соломи, а температура розм'якшення та плавлення – більш висока. Тому при їх спалюванні зола просипається крізь колосники і не захаращує прохід для повітря та димових газів. У випадку спалювання пелет з сільськогосподарських відходів, їх поверхня швидко покривається кіркою, яка ускладнює вихід піролізних газів з середини гранул та проникнення кисню у середину частинок, що перешкоджає горінню вуглецевого залишку. Внаслідок цього гранули повністю не згоряють, а їх залишки осідають на поверхнях колосників. На цих поверхнях утворюються конгломерати з розм'якшеної золи, смоли, що не розклася внаслідок піролізу, та недогорілих гранул. Процес горіння в пальнику уповільнюється, а температура в камері пальника зменшується. Внаслідок цього конгломерати з розплаву золи твердіють та майже повністю перекривають прохід для повітря та димових газів через протоки.

Виходячи з викладеного, пропонуються наступні заходи з вдосконалення конструкційних характеристик пелетного пальника для можливості його використання для спалювання пелет аграрного походження. Як базовий варіант розглядається конструкція пальника «Пелетрон» який призначений для спалювання пелет вищої якості, які виготовлені з деревини, мають низьку зольність, високу температуру плавлення золи та високу теплоту згоряння.

5.1.1 Вдосконалення методу подачі палива з бункера

В пелетному пальнику «Пелетрон» застосовується гравітаційний спосіб аподачі палива з бункера до камери згоряння. Цей спосіб передбачає вільне висипання пелет з бункера під дією своєї ваги. Перевага цього способу полягає у відсутності необхідності у застосуванні додаткових механічних пристроїв для подачі, що передбачають використання електричних двигунів та джерела електроенергії. Недолік цього способу пов'язаний з можливою нерівномірністю витрати пелет, що надходять в камеру згоряння. В бункері утворюється воронка біля вихідного отвору, яку необхідно періодично руйнувати, щоб за її наявності не гальмувалося висипання гранульованого палива. За рахунок можливої нерівномірності подачі палива процес горіння може призупинитися через його нестачу в камері згоряння, або через надлишок, що може накрити зону горіння та знизити її температуру.

Для запобігання цих недоліків доцільним є застосування механічної регульованої подачі палива за допомогою шнека. За допомогою шнека паливо підіймається з бункера, що розташований не зверху над камерою згоряння, а з боку від неї. Шнек подає палива на рівень, що вищий, ніж рівень пелет в бункері. Витрати палива регулюються за показниками датчиків, що контролюють процес горіння. При нестачі палива, що викликає зниження температури в камері згоряння, подача палива шнеком прискорюється. При перевищенні необхідної температури шнек призупиняє подачу пелетного палива.

Застосування шнекової подачі також запобігає потраплянню полум'я у бункер через те, що пелети у шнеку надходять не суцільною масою, а більш розрідженою. Крім того, полум'я зазвичай не надходить з пальника, що розташований вище рівня пелетів в бункері, в сам бункер. Але застосування шнекової подачі палива вимагає наявності електродвигуна, самого шнеку, джерела електроенергії та датчиків температури в камері згоряння.

5.1.2 Вимушена регульована подача повітря в камеру згорання

В базовому варіанті пелетного пальника повітря, що необхідне для підтримання процесу згорання палива, подається в камеру згорання через отвір в дверцятах камери. Воно надходить за рахунок природної тяги, що утворюється в трубі для виходу газоподібних продуктів згорання.

Внаслідок можливого захаращення продуктами неповного згорання пелетного палива повітряних потоків, виникає ситуація нестачі повітря для підтримання процесу горіння, або надлишок холодного зовнішнього повітря, що охолоджує камеру згорання. В таких випадках процес горіння буде нестійким та нестабільним. Тому рекомендується регулювати витрати повітря відповідно до режиму горіння пелет в пальнику.

Запобіганню цих ситуацій можливу шляхом застосування додаткової механічної вимушеної подачі повітря в зону горіння за допомогою вентилятора. Його робота та витрати повітря повинні регулюватися відповідно до встановленого режиму горіння, а також відповідно до витрат палива, що подається з бункера в камеру згорання. Вентилятор доцільно встановлювати під шнеком, щоб додаткове повітря подавалося у нижню частину камери згорання.

Доцільно передбачити також можливість попереднього підігріву повітря, що надходить до камери. Для цього необхідно в конструкції пальника передбачити рекуперативний теплообмінний пристрій, у якому здійснюється підігрів повітря, що надходить з вентилятора, димовими газами.

5.1.3 Запобігання утворенню конгломератів з розм'якшеної золи та недогорілих гранул

В базовому варіанті пальника зола, що утворюється після згорання пелет, видаляється з камери згорання потоком повітря, що надходить ззовні. У випадку пелет з соломи, через низьку температуру плавлення золи, що залишається після згорання пелет з соломи, на поверхнях колосників камери згорання утворюються конгломерати з цієї розплавленої золи та недогорілих

частинок біопалива. Внаслідок цього уповільнюється процес догорання цих частинок. Крім того, ці конгломерати перешкоджають вільному руху повітря, що необхідне для підтримання процесу горіння. Якщо неможливо запобігти процесу їх утворення, необхідно передбачити спеціальні пристрої для їх руйнування та видалення з камери згорання.

Один з варіантів вирішення цієї проблеми є встановлення ротаційної камери згорання в пелетному пальнику. Цей спосіб видалення руйнування конгломератів та видалення золи вже застосовується в ряді інноваційних рішень стосовно пелетних пальників. При обертових рухах камери згорання частинки недогорілого палива також знаходяться у русі та не зафіксуються на певних ділянках поверхні пальника. Через це покращується контакт їх поверхонь з повітрям. Зменшується також степінь налипання смоли та розплавленої золи на поверхнях камери згорання. Цим самим забезпечується очищення поверхонь камери від золи і шлаків. При цьому утворюється також закручений, більш компактний факел полум'я.

Для запобігання фіксації та налипанню конгломератів з продуктів згорання на поверхнях пальника доцільно також застосовувати подвійні колосникові решітки, в яких передбачено один рухомий колосник і один - нерухомий. Цей спосіб видалення незгорілого палива або золи також застосовується в деяких сучасних пелетних пальниках. Принцип його роботи полягає в тому, що рухомий колосник, що знаходиться зверху над нерухомим колосником, здійснює періодичні зворотно-поступальні рухи у горизонтальній площині пальника. Коли рухомий колосник відходить назад, на нього навантажується порція пелетного палива. Потім він вертається в зону горіння, де протікає процес спалювання пелет. При цьому він водночас виштовхує золу та закоксовані конгломерати з камери згорання в зольник котла. Недоліком такого способу очищення пальника від золи є те, що зазор між рухомим та нерухомим колосниками може забиватися залишками золи і тоді рух колосника може загальмуватися.

Для запобігання процесу спікання та налипання золи можуть також застосовуватися ворошилки палива з механічним приводом. Ворошилка, що рухається над поверхнею колосника, при кожній подачі нової порції палива рівномірно розподіляє пелети по всій поверхні колосників, руйнує конгломерати, що утворюються, і одночасно видаляє золу, скидаючи її з колосника у зольник. Ворошилка забезпечує також більш ефективний контакт палива з повітрям. За рахунок цього підвищується якість спалювання пелет та забезпечується видалення золи з пальника.

5.1.4 Регулювання процесу видалення золи з камери згоряння

В базовому варіанті пальника видалення золи, що має вигляд пилу, передбачається разом з потоком повітря, що надходить до пальника ззовні за рахунок природної тяги в димарі. Це буде так званий пневматичний метод очистки пальника від золи. Якщо зола складається переважно з конгломератів та закоксованих залишків пального, для її видалення необхідно застосувати спеціальний пристрій. Це може бути, наприклад, шнековий транспортер, що автоматично видаляє золу з камери згоряння та перемішує її. Видалення золи може здійснюватися також рухомим колосником, що розглядався вище.

5.1.5 Підвищення температури в камері згоряння

У базовому варіанті пальника, що призначений для спалювання низькозольного пелетного палива з деревини стандарту А, забезпечується рівень температури, що є достатнім для підтримки процесу горіння. Корпус цього пальника - металевий. У випадку ж спалювання пелет невисокої якості, або виготовлених з сільськогосподарських відходів, необхідно передбачити заходи з підтримання належного температурного рівня в камері згоряння пальника. З цією метою необхідно провести теплоізоляцію камери згоряння. Можна, наприклад, виготовити її з керамічного матеріалу, або нанести на зовнішню поверхню металевого корпусу камери згоряння шар теплоізоляційного матеріалу. Як такий матеріал може бути застосовано

вироби з базальтових волокон, або з вогнетривких матеріалів, таких, наприклад, як керамічні плити або шамотна цегла. Ці заходи дозволять підвищити температуру в камері згоряння та покращити ефективність процесу спалювання пелет.

5.2 Рекомендації щодо подальшого збільшення використання пелет різного типу в котлах малої потужності

Пелети можна виготовляти не тільки із залишків сільського господарства, а й з усього органічно-рослинного матеріалу, що нас оточує. Це може бути і опале листя, суха трава, бур'яни, очерет та інше (рисунок 5.1). Для цього можна використовувати обладнання для малотоннажного виробництва, що може використовуватися в індивідуально-побутовому секторі. Це оригінальної розробленої конструкції подрібнювач та гранулятор (рисунок 5.2).



Рис. 5.1 Сировина для виробництва пелет

Подрібнювач являє собою обладнання з однією станиною, має один електричний двигун потужністю 4 кВт, продуктивністю 50.....400 кг/год. Сировина (солома, опале листя) подається для подрібнення в роторну дробарку, звідки подрібнена маса через направляючий лоток потрапляє в ємність. Гранулятор комплектується спеціальною потовщеною матрицею, з

радіальними отворами 6 – 8 мм, потужність становить 5 кВт. Продуктивність становить 50...200 кг/год.



а)



б)

а) подрібнювач, б) гранулятор

Рис. 5.2 Устаткування для малотоннажного виробництва важкогранульованих рослинних пелет

На рисунку 5.3 показано процес подрібнення соломи сої, а на рисунку 5.4 – очерету.



Рис. 5.3 Фото подрібнення соломи сої



Рис. 5.4 Фото подрібнення очерету

Рекомендації щодо прискорення темпів використання біопалива.

Стабільна державна політика має важливе значення для забезпечення довгострокової перспективи для компаній, які можуть інвестувати у потужності для виробництва пелет. Слід вживати заходи для забезпечення того, щоб ціни на пелети різного типу залишалися на прийнятному для споживачів рівні, наприклад, зниження ПДВ відповідно до інших енергоносіїв. Замість субсидування викопного палива кошти повинні бути спрямовані на споживачів, які бажають перейти від застарілого обладнання, яке працює на викопному паливі, до сучасного і ефективного. Це прискорить впровадження відновлюваних джерел енергії, зменшить викиди забруднюючих речовин у повітря, підвищить ефективність використання ресурсів, одночасно захищаючи вразливих споживачів від енергетичної бідності.

Агробіомаса широко доступна з різних джерел і в різних формах по всій території України. Паливні властивості агробіомаси є більш складними, ніж властивості деревної біомаси. Як результат, її використання потребує спеціально розроблених систем, які враховують ці особливості.

Що стосується основних компонентів опалювальної установки на агробіомасі, слід враховувати наступне:

- подача палива: автоматична подача є важливою особливістю всіх сучасних систем опалення на біомасі, залежно від фізичної форми, в якій

агробіомаса доставляється на об'єкт, існують різноманітні варіанти, від подавальних шнеків до рухомих підлог і автоматичних ліній для подачі.

– спалювання: рухомі колосникові системи є найсучаснішими для горіння агробіомаси, що забезпечує гарне змішування повітря та палива та забезпечує високий рівень вигорання. Ще однією майбутньою технологією є концепція газифікації для невеликих систем агробіомаси.

– теплообмінник: необхідне часте та відповідне очищення поверхонь для роботи з вищим рівнем відкладень від спалювання агробіомаси.

– видалення золи: вищий вміст золи вимагає більш частого та відповідного очищення золи.

– системи керування: відповідний контроль та сприяння підвищенню ефективності спалювання.

– очищення димових газів: залежно від нормативних вимог і обмежень, відповідні рішення можна використовувати для контролю викидів пилу, NOx або кислотних газів.

5.3. Висновки до п'ятого розділу

1. За результатами проведених експериментів проаналізовано особливості спалювання пелет (агророслинних та деревних), а також зроблено вибір оптимальних режимів спалювання пелет різного типу.

2. Надано рекомендації стосовно подальшого збільшення використання пелет різного типу в котлах малої потужності.

ВИСНОВКИ

1. Створено теплофізичні моделі пальника та котла для спалювання гранульованого агропалива, розроблено цифрові двійники пальника і котла. Розраховано оптимальні аеродинамічні та теплові режими спалювання, надано раціональні режими горіння. Вдосконалено та впроваджено експериментальну установку твердопаливного котла з пелетним пальником для спалювання рослинних пелет для опалення будинку пасивного типу ІТТФ НАН України.

2. При спалюванні пелет аграрного походження в котлах можна забезпечити гаряче водопостачання та теплоту для опалення будівель. Ці процеси забезпечується автономними незалежними системами опалення. Такі системи можуть бути різної теплопродуктивності та можуть використовуватись для приватних будинків, а також для великих районів або підприємств.

2. Проведено цикл експериментальних досліджень горіння та оптимальних режимів спалювання цілої низки агропелет із соломи злаків (пшениці, ячменю, вівса); технічних культур – кукурудзи, сухого жому цукрових буряків, а також деревини. Експериментально встановлені оптимальні теплові режими спалювання та утворення золи без спікання і склування залишку.

3. Експериментальний пальник доведено до працездатного стану, виявлено умови його стійкої роботи з належними показниками керованості процесу, повноти вигорання палива та показників емісії забруднюючих речовин. Пальник забезпечує виділення летючих речовин та їх займання у просторі пальника з формуванням палаючого факела у топковому просторі котла. Досягнута потужність експериментального пальника 65 кВт відповідає розрахунковій.

4. В роботі наведено результати розрахунку горіння пелет за допомогою скінчено-елементних CFD-моделей котла і пальника. Комп'ютерна модель є чутливою до теплофізичних властивостей реагуючих

компонентів і кінетики реакцій, проте коректне їх завдання дозволить проводити досить точну оцінку аеродинамічної структури в пальниках і топці котла, в яку даний пальник встановлено, а також емісійних характеристик викидів при спалюванні біомаси.

5. За розробленою моделлю визначено характеристики роботи побутового пелетного пальника малої потужності, зокрема визначено максимальну температуру в шарі пелет, що горять, температуру газоподібних продуктів згорання, що видаляються з пальника за рахунок природної тяги, та їх хімічний склад.

6. Досліджена емісія CO та NO_x при спалюванні подрібненого палива в пальнику з постійним загальним надлишком повітря та змінною часткою вторинного повітря, які дозволили виявити режими спалювання, що прийнятні для реалізації в промисловому обладнанні різної потужності. Екологічні показники продуктів спалювання агропелет в пальках малої потужності в цілому відповідають нормам охорони довкілля.

7. Вкрай важливо в подальшому дослідити і виявити оптимальні режимні карти спалювання в залежності від повноти спалювання; викидів шкідливих газів (NO_x); структури золи, температури теплоносія.

8. На основі проведених досліджень підготовлено рекомендації для підвищення ефективності горіння при спалюванні пелетного біопалива та модернізації пальників котлів малої потужності комунальної та промислової теплоенергетики, соціально-бюджетної сфери, індивідуально-побутового сектора.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Міжнародне енергетичне агентство (ІЕА). Режим доступу: <https://www.iea.org/reports/bioenergy-2>
2. Продовольча та сільськогосподарська організація (ФАО) Режим доступу: <https://www.fao.org/>
3. United Nations Framework Convention on Climate Change, Kyoto Protocol to the united nations framework convention on climate chance, in: United Nations Framework Convention on Climate Change, United Nations, Kyoto, JP, 1998.
4. European Parliament and the Council, Directive 2001/77/EC of the European Parliament and of the Council of 27 September 2001 on the promotion of electricity produced from renewable energy sources in the internal electricity market, in: European Parliament and the Council, European Parliament and the Council, Brussels, BE, 2001.
5. European Parliament and the Council, Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC, in: European Parliament and the Council, European Parliament and the Council, Brussels, BE, 2009.
6. Commission of the European Communities, An Energy Policy for Europe, Commission of the European Communities, Brussels, BE, 2007.
7. G. Fiorese, M. Catenacci, V. Bosetti, E. Verdolini, The power of biomass: experts disclose the potential for success of bioenergy technologies, Energy Policy 65 (2014) 94-114.
8. Eurostat. Agricultural production - crops - statistics explained. 2019. Режим доступу: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Agricultural_production_-_crops#Cereals
9. Eurostat. Agri-environmental indicator - energy use. 2020. Режим доступу: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Agri-environmental_indicator_-_energy_use&oldid=322997

10. Rokicki T, Perkowska A, Klepacki B, Borawski P, Beldycka-Borawska A, Michalski K. Changes in energy consumption in agriculture in the eu countries. *Energies* 2021;14. <https://doi.org/10.3390/en14061570>.
11. de Visser C, de Buissonje F, Ellen H, Stanghellini C, van der Voort M. State of the Art on Energy Efficiency in Agriculture, Country data on energy consumption in different agroproduction sectors in the European countries. 2012.
12. Monforti F, Lugato E, Motola V, Bodis K, Scarlat N, Dallemand JF. Optimal energy use of agricultural crop residues preserving soil organic carbon stocks in Europe. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;44:519–29. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.033>.
13. Bardi U, El Asmar T, Lavacchi A. Turning electricity into food: the role of renewable energy in the future of agriculture. *J Clean Prod* 2013;53:224–31. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.04.014>.
14. Monforti-Ferrario F, Dallemand J-F, Pascua IP, Motola V, Banja M, Scarlat N, et al. Energy use in the EU food sector: State of play and opportunities for improvement. 2015. <https://doi.org/10.2790/158316>.
15. Gomiero T, Paoletti MG, Pimentel D. Energy and environmental issues in organic and conventional agriculture. *CRC Crit Rev Plant Sci* 2008;27:239 – 54. <https://doi.org/10.1080/07352680802225456>.
16. Pfeiffer DA. Eating fossil fuels: oil, food, and the coming crisis in agriculture. Gabriola Island: New Society Publishers; 2006.
17. Directive 2018/2001/EC of 11 december 2018 on the Promotion of the Use of Energy from Renewable Sourc.
18. Andreu ABC, Calderoni M, Cremenescu C, Madani H, Pearson D, Rutz D, Schmitt B, Schmidt RR, Ø Skeiberg, Urchueguia J, Van Helden W, Wilis M. 2050 vision for 100% renewable heating and cooling in Europe. RHC-Platform; 2019.
19. Heletukha H.H., Zheliezna T.A., Drahniev S.V. Analiz barrieriv dlia vyrobnytstva enerhii z biomasy v Ukraini. Analitychna zapyska BAU № 21. URL: <https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/01/position-paper-uabio-21-ua.pdf>.

20. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. Режим доступу : <https://saee.gov.ua/>
21. Міністерство енергетики України. Режим доступу : <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/doccatalog/list?currDir=50358>
22. Bioenergy Association of Ukraine (2021). Available at: <https://uabio.org/>
23. Гелету́ха Г.Г., Желе́зна Т.А., Баштовий А.І., Гелету́ха Г.І. Огляд кращих практик організації роботи ринку біопалива у країнах ЄС. Промислова теплотехніка. 2017. т. 39. № 5. С. 108 – 112.
24. Гелету́ха Г., Крамар В., Епик О., Антошук Т., Тітков В.. Комплексний аналіз українського ринку пелет з біомаси. 2016 р..
25. Чурілов Д.Г., Калініченко В.М., Калініченко А.В., Малинська Л.В. Державне регулювання твердого біопалива як один із чинників збалансованого природокористування. Вісник Полтавської державної аграрної академії. 2012. №2. С. 89 – 93.
26. Міністерство інфраструктури України. Режим доступу : <https://mtu.gov.ua/>
27. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Режим доступу: <https://merg.gov.ua/>
28. Міністерство енергетики України. Режим доступу : <https://www.me.gov.ua/>
29. Міністерство економіки України. Режим доступу : <https://www.me.gov.ua/>
30. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. Режим доступу: <https://saee.gov.ua/uk/regulations>
31. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП) Режим доступу : <https://www.nerc.gov.ua/>
32. Хаустова В. Є., Гришова І. Ю., Костенко Д. М., Бутенко Т. В. Державна політика у сфері впровадження біоенергетичних технологій в

контексті її нормативно-правового забезпечення. Економіка АПК. 2021. № 11. С. 70 — 82. <https://doi.org/10.32317/2221-1055.202111070>

33. Головна сторінка розділу «Законодавство України» Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua>

34. Підготовка та впровадження проектів заміщення природного газу біомасою при виробництві теплової енергії в Україні: практичний посібник / за ред. Г. Гелетуخی. К.: Поліграф плюс, 2016. 104 с.

35. Royoa J., Canalisa P., Quintanaa D., Díaz-Ramírezb M., Sinb A., Rezeaub A., Experimental study on the ash behaviour in combustion of pelletized residual agricultural biomass, Fuel 239 (2019) 991–1000, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.11.054>

36. Scarlat N, Dallemand JF, Monforti-Ferrario F, Banja M. Renewable energy policy framework and bioenergy contribution in the European Union – An overview from National Renewable Energy Action Plans and Progress Reports. Renew Sustain Energy Rev 2015;51:969–85.

37. Scarlat N, Dallemand JF, Monforti-Ferrario F, Nita V. The role of biomass and bioenergy in a future bioeconomy: policies and facts. Environ Dev 2015;15:3–34.

38. Zeng T, Pollex T, Weller N, Lenz V, Nelles M. Blended biomass pellets as fuel for small scale combustion appliances: effect of blending on slag formation in the bottom ash and pre-evaluation options. Fuel 2018;212:108–16.

39. Horvat I., Dovi D., Filipovic P., Numerical and experimental methods in development of the novel biomass combustion system concept for wood and agro pellets Energy 231 (2021) 120929 <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120929>

40. В. Антоненко, В. Зубенко, Є. Олійник, С. Радченко. "Практичний посібник з використання біомаси в якості палива у муніципальному секторі України (для представників державних та комунальних установ)" підготовлено на замовлення проекту Програми розвитку Організації Об'єднаних Націй та Глобального Екологічного Фонду "Розвиток та комерціалізація біоенергетичних технологій у муніципальному секторі в

Україні". DOI: http://bioenergy.in.ua/media/filer_public/ee/f5/eef5a439-70ab-4d49-85e2-fad0741edc96/jkhfin.pdf

41. Гелетуха Г., Олійник Є., Антоненко В., Чаплигін С., Зубенко В., Радченко С.. Проведення комплексного дослідження ринку котлів, що працюють на біомасі в Україні. 2016 р..

42. Голуб Г.А., Кухарець С.М. О.А. Марус, М.Ю. Павленко, К.М. Сера, В.В. Чуба. Біоенергетичні системи в аграрному виробництві. К.: НУБіП України. 2016. 226 с.

43. Підготовка та впровадження проектів заміщення природного газу біомасою при виробництві теплової енергії в Україні. Практичний посібник за ред.. Г. Гелетуха. К.: 2015. 72 с.

44. Пелетний палик: пат. 45799 Україна: МПК F23D 21/00 № u2009 06217; заявл. 16.06.2009; опубл. 25.11.2009, Бюл. № 22.

45. Пелетний палик: пат. 82429 Україна: МПК F23D 1/00 № u2013 06494; заявл. 24.05.2013; опубл. 25.07.2013, Бюл. № 14.

46. Механізм для чищення пелетного палика: пат. 83866 Україна: МПК F23D 1/00, F23H 15/00, F23H 11/00 № u2013 10082; заявл. 13.08.2013; опубл. 25.09.2013, Бюл. № 18.

47. Цехмейструк М.Г. Аспекти вирощування кукурудзи / М.Г. Цехмейструк, Н.М. Музафаров, К.М. Манько // Агробізнес сьогодні, 2014. – №8 (279). – С. 28-33.

48. A. Veremiichuk. Experimental studies of burning pellets in a burner up to 30 KW. Journal of new technologies in environmental science. № 1. Vol. 7. 2023. P. 3-10.

49. Косолап М.П. Система землеробства No-till: Навч. посібник / М.П. Косолап, О.П. Кротінов – К.: «Логос», 2011. – 352 с.

50. Лисенко О. М., Веремійчук Г. М., Сірий О. А. Дослідження спалювання пелет сільськогосподарського походження у котлах потужністю до 25 кВт. Теплофізика та Теплоенергетика. 2022. Т. 44. №3. С. 99-108.

51. Басок Б. І., Давиденко Б. В., Кужель Л. М., Лисенко О. М., Веремійчук Г. М. Експериментальні дослідження спалювання рослинних пелет у побутовому котлі. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. 2021. Вип. 37. С. 13-23. DOI: <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2021.37.13-23>.

52. Басок Б. І., Гончарук С. М., Приємченко В. П., Лисенко О. М., Веремійчук Г.М. Дослідження теплотехнічних характеристик роботи побутового котла з механічним пелетним пальником. *Екологічна безпека та природокористування*. 2021. № 40(4). С. 60-72. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.4.60-72>

53. Basok B., Veremiichuk A., Baranyuk O., Siruy O. Simulation of biopellet combustion process in low power boilers. Actual problems of renewable energy, construction and environmental engineering, Kielce. 2021. P. 141-144.

54. Limousy L, Jeguirim M, Dutournie P, Kraiem N, Lajili M, Said R. Gaseous products and particulate matter emissions of biomass residential boiler fired with spent coffee grounds pellets. *Fuel* 2013; 107:323-9.

55. Limousy L, Jeguirim M, Dutournie P, Kraiem N, Lajili M, Said R. Gaseous products and particulate matter emissions of biomass residential boiler fired with spent coffee grounds pellets. *Fuel* 2013; 107:323-9.

56. Kraiem N, Lajili M, Limousy L, Said R, Jeguirim M. Energy recovery from Tunisian agri-food wastes: evaluation of combustion performance and emissions characteristics of green pellets prepared from tomato residues and grape marc. *Energy* 2016; 107:40918.

57. Vicente E, Vicente A, Evtuygina M, Tarelho L, Almeida S, Alves C. Emissions from residential combustion of certified and uncertified pellets. *Renew Energy* 2020; 161:1059-71.

58. Verma V, Bram S, Delattin F, Laha P, Vandendael I, Hubin A, et al. Agro-pellets for domestic heating boilers: standard laboratory and real life performance. *Appl Energy* 2012; 90(1):17-23.

59. Horvat I, Dovic D, Filipovi_c P. Laboratory testing of domestic hot water boiler while fired with different biomass pellets. In: 13th Conference on sustainable

development of energy, water and environment systems. Palermo, Italy: SDEWES; 2018.

60. Horvat I, Dovic D. Combustion of agricultural biomass - issues and solutions. *Trans FAMENA* 2018; 42:75-86.

61. Zhou A, Xu H, Xu M, Yu W, Li Z, Yang W. Numerical investigation of biomass co-combustion with methane for NO_x reduction. *Energy* 2020:194.

62. Echi S, Bouabidi A, Driss Z, Abid M. CFD simulation and optimization of industrial boiler. *Energy* 2019;169:105-14.

63. EN 303-5. Heating boilers – Part 5: heating boilers for solid fuels, manually and automatically stoked, nominal heat output of up to 500 kW – Terminology, requirements, testing and marking. 2012.

64. Yao Bin Yang, Robert Newman, Vida Sharifi, Jim Swithenbank, John Ariss. Mathematical modelling of straw combustion in a 38 MWe power plant furnace and effect of operating conditions. *Fuel*. 2007. 86. P. 129-142.

65. Zhou H., Jensen A. D., Glarborg P., Jensen P. A., Kavaliauskas A. Numerical modeling of straw combustion in a fixed bed. *Fuel*. 2005.V. 84. P. 389-403.

66. J. Porteiro, J. L. Miguez, E. Granada, J. C. Moran. Mathematical modeling of the combustion of a single wood particle.

67. Г. Г. Гелету́ха, Є. М. Олі́йник, В. О. Анто́ненко, В. О. Зу́бенко, С. В. Ра́дченко. Енергетичне використання агровідходів. Що варто знати про організаційні і технічні рішення. *Аналітична записка UABIO № 24*. 2020 р. 49 с.

68. Liu H. CFD Modeling of Biomass Gasification Using a Circulating Fluidized Bed Reactor: Ph. Doctoral dissertation. Waterloo, Canada, 2014. 140 p.

69. Jurena T. Numerical modelling of grate combustion. Brno. 2012. 97 s. Ph.D.

70. Б.І. Басок, Б.В. Давиденко, А.М. Павленко, Л.М. Кужель, В.Г. Новіков, С.М. Гончарук, Б.К. Ільєнко, Є.Є. Нікітін, Г.М. Веремійчук.

Зменшення тепловитрат через віконні конструкції. Том 76 № 3 (2023): Енерготехнології та ресурсозбереження. С. 43-57

71. Давыденко Б. В. Метод матричной прогонки для решения сеточных уравнений гидродинамики. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2008, № 5₅(35). С. 7-11.

72. Баранюк О. В., Сірій О. А., Веремійчук Г. М., Лисенко О. М. Моделювання горіння пелет у котлах потужністю до 25 кВт. *Теплофізика та Теплоенергетика*. 2022. Т. 44. №4. С. 89-98.

73. VIADRUS A0C Инструкция по обслуживанию и монтажу котла VIADRUS a.s. Vezručov 300 www.viadrus.cz

74. Воробйов Л.Й. Науково-практичні засади кондуктивної калориметрії. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.04 – «Прилади та методи вимірювання теплових величин». - Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, 2018. 294 с.

75. Вимірювальні пристрої Testo. URL: <https://www.testo.kiev.ua/ru/vybor-pribora-po-izmerjaemomu-parametru/gazoanalizatory.html>

76. Horvat I., Dovic D., Filipovic P. Numerical and experimental methods in development of the novel biomass combustion system concept for wood and agro pellets. *Energy*. 2021. V. 231. P. 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120929>

Список опублікованих праць за темою дисертації***Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:***

1. Басок Б. І., Давиденко Б. В., Кужель Л. М., Лисенко О. М., Веремійчук Г. М. (2021). Експериментальні дослідження спалювання рослинних пелет у побутовому котлі. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. Вип. 37. 13-23. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2021.37.13-23> [Категорія Б] (*Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних*).
2. Басок Б. І., Гончарук С. М., Приємченко В. П., Лисенко О. М., Веремійчук Г.М. (2021). Дослідження теплотехнічних характеристик роботи побутового котла з механічним пелетним пальником. *Екологічна безпека та природокористування*. № 40(4). 60-72. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.4.60-72> [Категорія Б] (*Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних*).
3. Лисенко О. М., Веремійчук Г. М., Сірий О. А. (2022) Дослідження спалювання пелет сільськогосподарського походження у котлах потужністю до 25 кВт. *Теплофізика та Теплоенергетика*. Т. 44. №3. 99-108. <https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2022.6> [Категорія Б] (*Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних*).
4. Баранюк О. В., Сірий О. А., Веремійчук Г. М., Лисенко О. М. (2022) Моделювання горіння пелет у котлах потужністю до 25 кВт. *Теплофізика та Теплоенергетика*. Т. 44. №4. 89-98. <https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2022.11> [Категорія Б] (*Внесок здобувача: проведення чисельного моделювання, обробка та аналіз отриманих даних*).
5. Басок Б.І., Давиденко Б.В., Павленко А.М., Кужель Л.М., Новіков В.Г., Гончарук С.М., Ільєнко Б.К., Нікітін Є.Є., Веремійчук Г.М. (2023)

Зменшення тепловитрат через віконні конструкції. *Енерготехнології та ресурсозбереження* Том 76 № 3. 43-57 [DOI:10.33070/etars.3.2023.04](https://doi.org/10.33070/etars.3.2023.04) [Scopus] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

6. А. Veremiichuk. Experimental studies of burning pellets in a burner up to 30 KW. *Journal of new technologies in environmental science*. № 1. Vol. 7. 2023. P. 3-10. [Doi: 10.53412/jntes-2023-1-1](https://doi.org/10.53412/jntes-2023-1-1) [Міжнародне видання] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Басок Б. І., Гончарук С. М., Веремійчук Г. М. (25-26 листопада, 2020) Експериментальне дослідження теплотехнічних характеристик роботи побутового котла з пелетним пальником. Тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Ресурси. Енергія. Багатофункціональні еко- та енергоефективні, ресурсозберігаючі технології в архітектурі, будівництві та суміжних галузях». Київ. 39-40. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

8. Лисенко О. М., Басок Б. І., Андрейчук С. В., Веремійчук Г. М. (9-11 березня, 2021) Забезпечення комфортних умов для споживачів при недотриманні температурного графіка подачі теплоти. *Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку*: збірник наукових праць VII Міжнародної науково-технічної та навчально-методичної конференції. Київ, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». 28. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

9. В. Basok, H. Veremiichuk (6-8 February 2020) Assessment of volume of agro-pellets in heat power industry of Ukraine. *Book of abstract IV International Scientific-Technical conference "Actual problems of renewable power engineering,*

construction and environmental engineering”. Kielce, Poland, 43-45. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

10. В. Basok, A. Veremiichuk, O. Baranyuk, O. Siruy (2021) Simulation of biopellet combustion process in low power boilers. «*Actual problems of renewable energy, construction and environmental engineering*», Department of Construction Networks and Systems, Koszalin University of Technology. Kielce, Poland, 141. (Внесок здобувача: проведення чисельного моделювання, обробка та аналіз отриманих даних).

11. Basok B., Lysenko O., Veremiichuk H., Siryi O. (24-27 November 2022) Combustion of plant pellets in a household boiler. «*Actual problems of renewable energy, construction and environmental engineering*»: book of abstracts VI International Scientific-Technical Conference. Kielce, Poland, 79-81. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

12. Veremiichuk H. (24-27 November 2022) Experimental studies of burning pellets in a burner up to 30 kw. «*Actual problems of renewable energy, construction and environmental engineering*»: book of abstracts VI International Scientific-Technical Conference. Kielce, Poland, 125-128. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

13. Басок Б.І., Веремійчук Г.М. (7-8 листопада, 2023) Аеродинаміка та теплообмін при спалюванні агропелет в котлах побутових споживачів. XIII Міжнародна онлайн конференція «Проблеми теплофізики та теплоенергетики». Київ. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).