

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Фізико-математичний факультет  
Кафедра загальної фізики та моделювання фізичних процесів

«На правах рукопису»

УДК 621.313.322

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Дарія Савченко \_\_\_\_\_  
(підпис) (ім'я, прізвище)

“ \_\_\_\_\_ ”

\_\_\_\_\_ 2024\_р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності 104 – фізика та астрономія

Освітньо – наукова/професійна програма «Комп'ютерне моделювання фізичних процесів»

на тему: «КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛООБМІНУ В СУЧАСНИХ ТЕПЛООБМІННИХ СИСТЕМАХ»

Виконав: студент другого (магістерського) рівня вищої освіти, групи

Кінзерський Антон

(ПІБ)

ОФ-21мп  
(шифр групи)



(підпис)

Науковий керівник

професор кафедри загальної фізики та моделювання фізичних процесів, д.т.н., професор Котовський Віталій Йосипович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ПІБ)



(підпис)

Консультант Моделювання процесів горіння в сучасних теплообмінних апаратах  
(назва розділу)

к.т.н., доцент, Воробйов Микита Валерійович


(науковий ступінь, вчене звання, ПІБ)



(підпис)

Рецензент професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем, д.т.н. Микитенко Володимир Іванович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ПІБ)



(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2024 р.

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського»**

Інститут/факультет \_\_\_\_\_ фізико-математичний \_\_\_\_\_  
(повна назва)

Кафедра \_\_\_\_\_ загальної фізики та моделювання фізичних процесів \_\_\_\_\_  
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною (освітньо-науковою) програмою «Комп'ютерне моделювання фізичних процесів»

Спеціальність \_\_\_\_\_ 104 – фізика та астрономія \_\_\_\_\_

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Дарія Савченко \_\_\_\_\_  
(підпис) (ім'я, прізвище)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_р.

**ЗАВДАННЯ  
на магістерську дисертацію студенту**

**Кінзерському Антону**

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Комп'ютерне моделювання процесів теплообміну в сучасних теплообмінних системах

Науковий керівник дисертації Котовський Віталій Йосипович, д.т.н., професор \_\_\_\_\_,  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «13» 11. 2023р. № 5250-с

2. Строк подання студентом дисертації 18.12.2023р.

3. Об'єкт дослідження \_\_\_\_\_ процеси, що протікають під час спалювання і так званих «білих» пелетів з деревини твердих сортів в комп'ютерній моделі топкової камери автоматичного котла на твердому паливі VIADRUS A0C.

4. Предмет дослідження (Вихідні дані – для магістерської дисертації за освітньо-професійною програмою) автоматичний котел на твердому паливі VIADRUS A0C потужністю 20 кВт, в якості палива в якому

використовувались дерев'яністі пелети, що подавались в факельний пальник розроблений компанією PellasX з витратою 2 кг/с при швидкості нагнітаємого феном повітря 7,5 м/с з температурою 300 °С

5. Перелік завдань, які потрібно розробити

1. Провести оглядовий аналіз літературних джерел щодо сучасної теорії горіння. Ознайомитись з теоретичними аспектами явища горіння, як фізико-хімічного процесу, визначити його класифікацію.

2. Провести аналіз сучасних мультифізичних платформ для моделювання фізичних та хімічних процесів.

3. Обґрунтувати вибір пакету прикладних програм ANSYS-Fluent та провести в ньому моделювання процесів спалювання пелет в топковій камері визначеного котла.

4. Обґрунтувати точність оцінки аеродинамічної структури потоку в пальниках і топці котла, при точно заданих теплофізичних властивостях спалюємого палива та провести верифікацію моделювання.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу Таблиця з початковими даними для проведення моделювання, моделі та фотографії окремих елементів пелетного котла, скриншоти екрану з результатами етапів моделювання, ескізи температурних полів продуктів горіння тощо.

7. Орієнтовний перелік публікацій

1. Тези «Програмний комплекс ANSYS-FLUENT у моделюванні теплогідрравлічних характеристик водогрійних котлів» у збірнику праць XXI Міжнар. молодіж. науково-практ. конф. у співавторстві з Котовським В. Й.

2. Наукова стаття «Моделювання теплогідрравлічних характеристик водогрійного котла при спалюванні паливних пелет з твердих сортів деревини» у співавторстві з Баранюк О. В. і Воробйовим М. В.

3. Навчальний посібник «Комп'ютерне моделювання у вирішенні завдань теплопровідності» у співавторстві з Котовським В. Й.

8. Консультанти розділів дисертації<sup>□</sup>

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Моделювання процесів горіння в сучасних теплообмінних апаратах	Воробйов М.В., доцент кафедри атомної енергетики	09.11.2023р.	23.11.2023р.

9. Дата видачі завдання 04.09.2023

## Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Проходження інструктажу з техніки безпеки та охорони праці	01.11.2023	Виконано
2	Ознайомлення з місцем роботи	01.11.2023	Виконано
3	Вивчення літературних джерел, складання огляду літератури	02.07.2023-02.08.2023	Виконано
4	Пошук і добір фактичних матеріалів, їх групування	03.08.2023-03.10.2023	Виконано
5	Наукові дослідження за темою магістерської дисертації (МД)	04.09.2023-04.11.2023	Виконано
6	Аналіз отриманих результатів	05.11.2023-15.11.2023	Виконано
7	Підготовка розділів МД на основі отриманих даних за темою МД	04.09.2023-25.11.2023	Виконано
8	Підготовка звіту з МД та оформлення презентацій до захисту	26.11.2023-16.12.2023	Виконано
9	Надання роботи на перевірку керівнику МД	17.12.2023	Виконано
10	Отримання відгуку від керівника МД	19.12.2023	Виконано
11	Перевірка МД на плагіат	19.12.23	Виконано
12	Формування плану публікацій за темою МД або документів по впровадженню (лист з підприємства або подання проекту впровадження в КПП ім. Ігоря Сікорського)	20.12.2023	Виконано
13	Подання МД на рецензію	20.12.2023	Виконано
14	Здача МД на нормо-контроль (додержання вимог до оформлення МД)	23.12.2023	Виконано
15	Попередній захист МД	26.12.23	Виконано
16	Виправлення матеріалу МД згідно з зауваженнями комісії на попередньому захисті	27.12.2023-08.01.2024	Виконано
17	Здача МД (друкований та електронний варіанти), Відгуку та Рецензії на кафедрі ЗФ та МФП	09.01.2024	Виконано

18	Відправка анотації МД на сайт кафедри ЗФ та МФП	09.01.2024	Виконано
19	Остаточний захист МД	16.01.2024	Виконано
20	Відправка матеріалів МД у бібліотеку КПІ ім. Ігоря Сікорського та сайт кафедри ЗФ та МФП	17.01.2024	Виконано

Студент



(підпис)

А. Кінзерський

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації



(підпис)

В. Й. Котовський

(ініціали, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Актуальність теми Актуальність досліджень, проведених у даній роботі, полягає в їх важливості для сучасного світу, де проблеми енергетичної ефективності, екологічної стійкості та безпеки мають вирішальне значення. Вивчення процесів горіння та його моделювання у програмних пакетах таких як COMSOL Multiphysics та ANSYS Fluent сприяють покращенню розуміння і оптимізації теплових процесів, що відіграють критичну роль у промисловості, енергетиці, будівництві та багатьох інших галузях.

Ці дослідження вирішують питання ефективності та безпеки теплових процесів, сприяючи зниженню викидів, оптимізації енергетичних витрат та підвищенню стабільності роботи технологічних установок.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Науково-дослідна робота «Фізико-топологічне моделювання процесів у вакуумних приладах з індукційним керуванням» - д/р № 0118u003782 2018 -2023 р.

Науково-дослідна робота «Моделювання фізичних процесів в імпульсній магнетронній розпилювальній системі» - д/р № 0118u0033783 2018 -2023 р.

Об'єкт дослідження процеси, що протікають під час спалювання пелетів з деревини твердих сортів в комп'ютерній моделі топкової камери автоматичного котла на твердому паливі VIADRUS A0C.

Предмет дослідження автоматичний котел на твердому паливі VIADRUS A0C потужністю 20 кВт, в якості палива в якому використовувались дерев'яні пелети, що подавались в факельний пальник розроблений компанією PellasX з витратою 2 кг/с при швидкості нагнітаємого феном повітря 7,5 м/с з температурою 300 °С.

Мета роботи Основною метою даного дослідження є підготовка комп'ютерної моделі водогрійного котла VIADRUS A0C (Польща), що буде використана для подальшої розробки, вдосконалення та впровадження пальників для спалювання пелет сільськогосподарського походження, а також визначення основних закономірностей процесу їх горіння й дослідження впливу режимних параметрів на розподіл температур в топковій камері, а також дослідження характеристик біоенергетичних трав'янистих та деревних культур як біопаливної сировини.

Методи дослідження методи математичної фізики, фізико-математичного моделювання і чисельного розрахунку за допомогою академічної ліцензії програмного комплексу ANSYS Student

### **Задачі дослідження**

1. Провести оглядовий аналіз літературних джерел щодо сучасної теорії горіння. Ознайомитись з теоретичними аспектами явища горіння, як фізико-хімічного процесу, визначити його класифікацію.

2. Провести аналіз сучасних мультифізичних платформ для моделювання фізичних та хімічних процесів.

3. Обґрунтувати вибір пакету прикладних програм ANSYS-Fluent та провести в ньому моделювання процесів спалювання пелет в топковій камері визначеного котла

4. Обґрунтувати точність оцінки аеродинамічної структури потоку в пальниках і топці котла, при точно заданих теплофізичних властивостях спалюємого палива та провести верифікацію моделювання.

**Наукова новизна одержаних результатів** При моделюванні процесів горіння твердих палив як правило розглядають процеси камерного спалювання для потужних енергетичних котлів, а стосовно невеликих опалювальних пристроїв, зокрема які працюють на пелетах, даних в літературі недостатньо. В даній роботі комплексно досліджено теплогідрравлічні характеристики побутового водогрійного котла під час спалювання паливних пелет. Дослідження включає в себе аналіз впливу різних параметрів на тепловиділення та ефективність передачі тепла, регулювання температури, а також вивчення впливу на тиск і обігрів теплоносія. Проведене моделювання роботи водогрійного котла показало можливість його роботи на різних типах паливних пелетів з визначенням параметрів роботи котла і розподілом температур в топці та елементах газового тракту.

**Практичне значення одержаних результатів** Результати роботи частково використані в ініціативних науково-дослідних темах кафедри. В подальшому результати дослідження можуть бути використані для підвищення ефективності процесу горіння при спалюванні біопалива та модернізації паливоспалюючих систем котлів малої потужності комунальної та промислової теплоенергетики, соціально-бюджетної сфери, індивідуально-побутового сектора тощо.

**Апробація результатів дисертації** Доповідь на XXI Міжнародній молодіжній науково-практичній конференції у м. Київ 13.04.2023 р. з публікацією тез «Програмний комплекс ANSYS-FLUENT у моделюванні теплогідрравлічних характеристик водогрійних котлів» у збірнику праць конференції.

**Публікації автора магістерської дисертації**

1. Кінзерський А., Котовський В. Й. Програмний комплекс ANSYS-FLUENT у моделюванні теплогідрравлічних характеристик водогрійних котлів. Історія розвитку науки, техніки та освіти : Збірник праць XXI Міжнародної молодіжної науково-практичної конференції, м. Київ, 13 квіт. 2023 р. / уклад. Л. П. Пономаренко. Київ, 2023. С. 92–95.

2. Баранюк О., Воробйов М., Кінзерський А. / Моделювання теплогідрравлічних характеристик водогрійного котла при спалюванні паливних пелет з твердих сортів деревини. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2023. Т. 34, № 2. С. 268–276.

3. Котовський В., Кінзерський А. Комп'ютерне моделювання у вирішенні завдань теплопровідності : навч. посібн. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 100 с.

**Ключові слова** Процеси горіння, теплові процеси, енергетична ефективність, гідродинаміка, теплообмінні апарати, автоматичні пелетні котли, моделювання теплових процесів, мультифізичні платформи, ANSYS.

**В роботі наведено:** використаної літератури - 63, сторінок: - 101, рисунків - 36, таблиць - 3.

## ABSTRACT

**Actuality of theme** The relevance of the research carried out in this work lies in its importance for the modern world, where the problems of energy efficiency, environmental sustainability and safety are of crucial importance. The study of combustion processes and its simulation in software packages such as COMSOL Multiphysics and ANSYS Fluent contribute to the improvement of understanding and optimization of thermal processes that play a critical role in industry, energy, construction and many other industries. These studies solve the issue of efficiency and safety of thermal processes, contributing to the reduction of emissions, optimization of energy costs and increasing the stability of the operation of technological installations.

### **Relationship of work with scientific programs, plans, themes**

Research work "Physico-Topological Modeling of Processes in Vacuum Devices with Inductive Control" - project No. 0118u003782 2018-2023.

Research work "Modeling Physical Processes in Pulse Magnetron Sputtering System" - project No. 0118u0033783 2018-2023.

**The object of research** Processes occurring during the combustion of wood pellet fuels in the computational model of the combustion chamber of the automatic solid fuel boiler VIADRUS A0C.

**The research subject** The automatic solid fuel boiler VIADRUS A0C with a capacity of 20 kW, fueled by woody pellets supplied to a burner developed by PellasX at a rate of 2 kg/s with an induced air velocity of 7.5 m/s at a temperature of 300 °C.

**Purpose of work** The main goal of this research is to prepare a computer model of the VIADRUS A0C water boiler (Poland), which will be used for further development, improvement, and implementation of burners for burning pellets of agricultural origin. Additionally, the study aims to identify the fundamental patterns of their combustion process, investigate the influence of operational parameters on the temperature distribution in the combustion chamber, and explore the characteristics of bioenergy herbaceous and woody crops as biofuel raw materials.

**Research methods** Methods of mathematical physics, physical-mathematical modeling, and numerical calculation using an academic license of the ANSYS Student software package.

### **Research tasks**

1. Conduct a comprehensive review of literature regarding the contemporary theory of combustion. Familiarize yourself with the theoretical aspects of the combustion phenomenon as a physico-chemical process and determine its classification.
2. Analyze modern multiphysics platforms for modeling physical and chemical processes.
3. Justify the selection of the ANSYS-Fluent package for applied programs and perform modeling of pellet combustion processes in the combustion chamber of a specified boiler.



4. Substantiate the accuracy of assessing the aerodynamic structure of the flow in the burners and boiler combustion chamber, assuming precisely defined thermophysical properties of the combusted fuel, and conduct modeling verification.

**Scientific novelty of the results** Typically, modeling combustion processes of solid fuels focuses on chamber combustion processes for powerful energy boilers. However, literature lacks information on small heating devices, especially those operating on pellets. This research comprehensively investigates the thermo-hydraulic characteristics of a domestic water boiler during pellet combustion. The study includes analyzing the influence of various parameters on heat release and heat transfer efficiency, temperature regulation, as well as examining the effects on pressure and heating of the heat carrier. The conducted modeling of the water boiler operation demonstrates its potential for operating with different types of pellet fuels, determining boiler operation parameters, and temperature distribution in the combustion chamber and gas passage elements.

**The practical significance of the results** The research results have been utilized in the initiative research topics of the department. In the future, the findings could contribute to enhancing the efficiency of the combustion process when burning biofuels and modernizing fuel-burning systems of low-capacity boilers in municipal and industrial heating, social-budgetary sectors, individual households, and more.

**Approbation of the results of the thesis** Report presented at the XXI International Youth Scientific and Practical Conference in Kyiv on April 13, 2023, with the publication of abstracts titled "ANSYS-FLUENT Software Suite in Modeling Thermo-Hydraulic Characteristics of Water Boilers" in the conference proceedings.

### **Publications**

1. Kinzerskyi A., Kotovskyi V. Y. ANSYS-FLUENT Software Suite in Modeling Thermo-Hydraulic Characteristics of Water Boilers. History of Science, Technology, and Education: Collection of Papers of the XXI International Youth Scientific and Practical Conference, Kyiv, April 13, 2023, Ed. L.P. Ponomarenko. Kyiv, 2023. P. 92–95.

2. Baraniuk O., Vorobiov M., Kinzerskyi A. Modeling Thermo-Hydraulic Characteristics of a Water Boiler when Burning Pellets from Hardwood. Scientific Notes of V.I. Vernadsky Taurida National University. Series: Technical Sciences. 2023. Vol. 34, No. 2. P. 268–276.

3. Kotovskyi V., Kinzerskyi A. Computer Modeling in Solving Heat Conduction Problems: Educational Manual. Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2023. 100 p.

**Keywords** Combustion processes, thermal processes, energy efficiency, hydrodynamics, heat exchange devices, automatic pellet boilers, modeling thermal processes, multiphysics platforms, ANSYS.

**The work contains:** references - 63, pages: - 101, figures - 36, tables - 3.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	12
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНИХ МУЛЬТИФІЗИЧНИХ ПЛАТФОРМ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ТА ХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ .....	14
1.1 Переваги комп'ютерного моделювання .....	14
1.2. Порівняння можливостей відомих програмних пакетів .....	18
1.3. Програмний пакет COMSOL Multiphysics .....	23
1.4. Програмний пакет ANSYS .....	28
Висновки до першого розділу.....	34
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ПРОЦЕСІВ ГОРІННЯ .....	35
2.1. Вступ до теорії горіння.....	35
2.2. Фізичні основи процесів горіння.....	43
2.2.1 Горіння газів та парів.....	45
2.2.2 Горіння рідин.....	48
2.2.3 Горіння твердих речовин .....	51
2.2.4 Термодинаміка горіння.....	52
2.3 Аналіз сучасних досліджень і публікацій.....	56
2.4. Різновиди палива для теплообмінних апаратів.....	61
2.4.1 Пальне на основі електрики .....	62
2.4.2 Пальне у вигляді газу.....	63
2.4.3 Рідке паливо.....	65
2.4.4 Тверде паливо .....	68
2.5. Використання пелет в якості альтернативного палива .....	71
2.6. Теплогідрравлічні характеристики водогрійного котла при спалюванні паливних пелет .....	74
2.6.1 Ефективність передачі тепла .....	74
2.6.2 Регулювання температури.....	76

2.6.3 Тиск теплоносія.....	76
2.6.4 Оптимізація використання паливних пелет .....	78
Висновки до другого розділу .....	79
<b>РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ГОРІННЯ В СУЧАСНИХ ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТАХ.....</b>	<b>80</b>
3.1. Методика моделювання спалювання палива в пелетному котлі .....	80
3.2. Опис моделі автоматичного пелетного котла .....	83
3.3. Проведення моделювання в програмі ANSYS Fluent.....	85
3.4. Аналіз та верифікація результатів моделювання.....	88
Висновки до третього розділу .....	93
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>94</b>
<b>ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....</b>	<b>96</b>

## ВСТУП

В сучасному світі дуже важливим і актуальним є питання сталої енергетики та збереження навколишнього середовища. З цих міркувань роль альтернативних джерел енергії, зокрема паливних пелет, зростає швидкими темпами. Вибір теми даної роботи обумовлений саме необхідністю вивчення та вдосконалення важливого аспекту використання пелетних котлів в системах приватного опалення.

Головною метою цього дослідження є створення комп'ютерної моделі водогрійного котла VIADRUS A0C (Польща), яка буде використовуватися для подальшої розробки, удосконалення та впровадження пальників для згорання пелет сільськогосподарського походження. Також вивчається основні закономірності процесу горіння пелет та вплив режимних параметрів на розподіл температур у топковій камері, аналізуються характеристики біоенергетичних рослин та деревних культур як потенційної біопаливної сировини.

Для досягнення поставленої мети було проведено аналітичний огляд літератури щодо сучасних підходів до використання паливних пелет у водогрійних котлах, вивчено теоретичні аспекти згорання палива в цілому, а також теплогідрравлічні властивості пелет та їх вплив на ефективність теплопередачі, побудовано модель досліджуемого пелетного котла та верифіковано дані, отримані в результаті моделювання.

Дослідження використовує чисельний метод з використанням академічної ліцензії програмного комплексу ANSYS Student, яка є у вільному доступі з 2015 року і призначена для розв'язування ознайомчих і освітніх завдань у академічному середовищі.

Об'єктом дослідження є процеси, які відбуваються під час згорання "білих" пелет з деревини твердих сортів в комп'ютерній моделі топкової камери автоматичного котла на твердому паливі VIADRUS A0C.

Предметом дослідження є автоматичний котел на твердому паливі VIADRUS A0C з потужністю 20 кВт, призначений переважно для опалення малих будинків, дач, невеликих майстерень тощо. У якості палива використовуються дерев'яні пелети, що подаються в факельний пальник, розроблений компанією PellasX, з витратою 2 кг/с при швидкості нагнітаємого повітря 7,5 м/с і температурою 300 °С. Для розробки моделі використовувалися дані з відкритих джерел.

Наукова новизна дослідження полягає в розкритті та аналізі впливу теплогідрравлічних параметрів водогрійного котла і властивостей паливних пелет на ефективність використання цього котла, що сприятиме подальшому розвитку та удосконаленню систем опалення на основі відновлювальних джерел енергії. Отже дана тема є актуальною.

Особистий внесок автора полягає у вивченні теоретичних аспектів згоряння палив у сучасних теплообмінних системах, проведенні комплексного аналізу теплогідрравлічних характеристик водогрійного котла при використанні паливних пелет, що надало можливість проведення систематизації отриманих даних та верифікації результатів чисельного моделювання для отримання об'єктивної інформації.

# РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНИХ МУЛЬТИФІЗИЧНИХ ПЛАТФОРМ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ТА ХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

## 1.1 Переваги комп'ютерного моделювання

Комп'ютерне моделювання (КМ) є ключовим інструментом у сучасному науковому та технологічному прогресі, знаходячи застосування у широкому спектрі галузей, від інженерії та науки до медицини та економіки. Завдяки постійному розвитку обчислювальної техніки та програмного забезпечення, КМ стало незамінним інструментом для прогнозування, аналізу та оптимізації складних систем і процесів.

У медицині комп'ютерні моделі допомагають вивчати та передбачати розвиток патологічних станів людини, а також тестувати нові ліки та процедури без ризику для пацієнтів.

У фінансовому секторі вони використовуються для прогнозування ринкових тенденцій та ризиків, що дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо інвестицій та управління активами.

У сфері екології та сталого розвитку комп'ютерні моделі допомагають аналізувати вплив людської діяльності на довкілля та розробляти стратегії зменшення негативного впливу людства на екосистеми.

Нарешті, у сфері науки та досліджень комп'ютерні моделі допомагають науковцям краще розуміти складні фізичні, біологічні та хімічні процеси, які не завжди можна вивчати або спостерігати в реальному часі. В інженерії вони дозволяють прототипувати та тестувати нові конструкції, пристрої та системи, що зменшує ризики та витрати на розробку нових технологій.

Дослідження комп'ютерних моделей стає привабливим в зв'язку з їхньою здатністю виконувати обчислювальні експерименти, особливо там, де реальні експерименти ускладнені фінансовими або фізичними обмеженнями, або коли їх результати можуть бути непередбачуваними. Логічність і структурованість

комп'ютерних моделей (Рисунок 1.1) надають можливість виділити основні фактори, які визначають властивості оригінального об'єкта (або цілого класу об'єктів). Зокрема, вони дозволяють вивчати відгук модельованої фізичної системи на зміни параметрів і початкових умов.

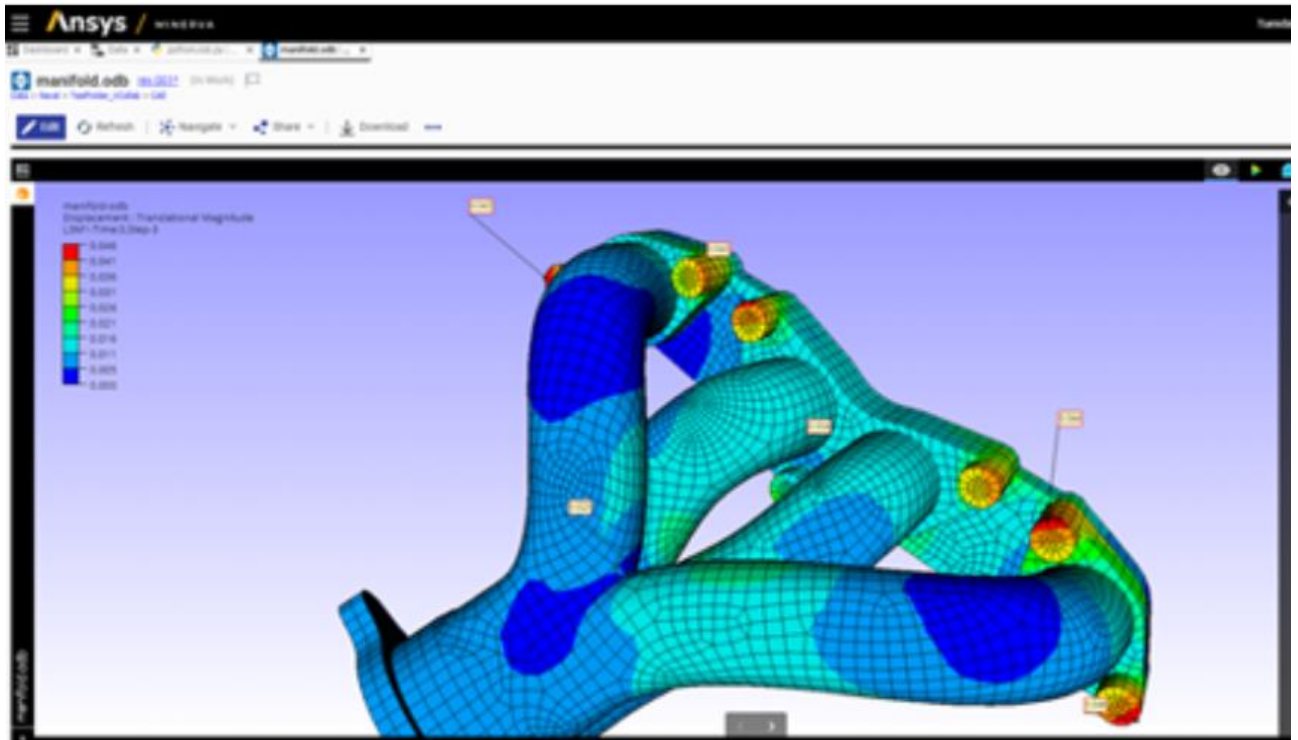


Рисунок 1.1 – Модель колектора для автомобіля, побудована в програмі Ansys

Створення комп'ютерної моделі базується на абстрагуванні від конкретної природи явищ або досліджуваного об'єкта і включає два етапи: спочатку створення якісної, а потім кількісної моделі. З виявленням і передаванням на комп'ютерну модель якнайбільшої кількості значущих властивостей, модель стає дедалі більш приближеною до реального об'єкта. Комп'ютерне моделювання включає проведення серії обчислювальних експериментів на комп'ютері з метою аналізу, інтерпретації та порівняння результатів моделювання з реальною поведінкою досліджуваного об'єкта, а також, за необхідності, подальше уточнення моделі.

Існує два типи моделювання: аналітичне та імітаційне. В першому випадку вивчаються математичні (абстрактні) моделі реального об'єкту у вигляді алгебраїчних, диференціальних та інших рівнянь. Ці моделі передбачають однозначну обчислювальну процедуру, яка призводить до точного розв'язку. При імітаційному моделюванні досліджуються математичні моделі у вигляді алгоритмів, які відтворюють функціонування досліджуваної системи через послідовне виконання багатьох елементарних операцій.

Використання методів КМ дозволяє отримувати високоточні результати, враховуючи різноманітні робочі умови і фізичні явища. КМ відкриває можливості:

- розширити коло дослідницьких об'єктів, вивчаючи неповторювані явища, явища минулого і майбутнього, а також об'єкти, які не можна відтворити в реальних умовах;
- візуалізувати об'єкти будь-якої природи, включаючи абстрактні;
- керувати часом (прискорювати, уповільнювати і т.д.);
- проводити багаторазові випробування моделі, кожен раз повертаючи її в початковий стан;
- отримувати різні характеристики об'єкта у числовому або графічному вигляді;
- знаходити оптимальну конструкцію об'єкта, не виготовляючи його пробних примірників;
- проводити експерименти без ризику негативних наслідків для здоров'я людини або навколишнього середовища.

Отже, КМ допомагає дослідникам розуміти, проектувати і оптимізувати процеси і пристрої з урахуванням реальних умов їх функціонування [1].

Ефективність та оптимальний режим роботи теплообмінних систем є критичними факторами для забезпечення енергоефективності та сталого розвитку в різних галузях, включаючи виробництво, енергетику та екологію. У



цьому контексті КМ виявляється потужним інструментом для аналізу та вдосконалення теплообмінних процесів.

КМ теплообміну забезпечує широкий спектр можливостей та вигод, серед яких слід виділити наступні:

1. Ефективність досліджень. КМ дозволяє проводити швидкі, точні та ефективні дослідження без необхідності витрат на реальні експерименти. Це дозволяє вченим швидше та ефективніше вивчати та аналізувати різні сценарії теплообміну в сучасних системах.

2. Економія ресурсів. Завдяки КМ можна уникнути зайвих фінансових витрат на проведення дорогих експериментів та виробничих процесів, що дозволяє зберігати ресурси та витрати, пов'язані з матеріалами та енергією.

3. Прогнозування поведінки системи. Комп'ютерні моделі дозволяють прогнозувати поведінку теплообмінних систем у різних умовах, що є надзвичайно корисним при проектуванні нових систем та удосконаленні існуючих. Це дозволяє зменшити кількість помилок та ризиків, пов'язаних з експлуатацією та розробкою нових систем.

4. Гнучкість та адаптивність. Комп'ютерні моделі можуть бути легко змінені та адаптовані для врахування нових параметрів та умов, що дозволяє вченим та інженерам швидше реагувати на зміни в технологічних вимогах та умовах експлуатації.

5. Оптимізація процесів. КМ дозволяє визначити оптимальні параметри та умови для досягнення найбільш ефективного теплообміну. Це допомагає вдосконалити енергоефективність та знизити витрати на енергію у теплообмінних системах.

Загалом, використання комп'ютерного моделювання в дослідженнях та проектуванні, у даному випадку теплообмінних систем, має значний потенціал для розвитку сучасних технологій та оптимізації процесів, що робить його невід'ємною складовою для подальшого прогресу у цій галузі.

## 1.2. Порівняння можливостей відомих програмних пакетів

Програмні пакети для КМ є важливим інструментом у багатьох галузях, включаючи інженерію, науку, медицину, екологію тощо. Вони створені для того, щоб допомагати дослідникам та інженерам аналізувати та оптимізувати складні фізичні процеси, включаючи теплообмін, течії рідини, та інші важливі явища. Багато з цих пакетів базуються на чисельних методах та різноманітних математичних моделях, які дозволяють точно моделювати поведінку системи у різних умовах.

Наприклад, MATLAB з модулем Simulink (Рисунок 1.2) є потужним і універсальним інструментом для КМ та аналізу різноманітних фізичних процесів, включаючи процеси теплообміну.

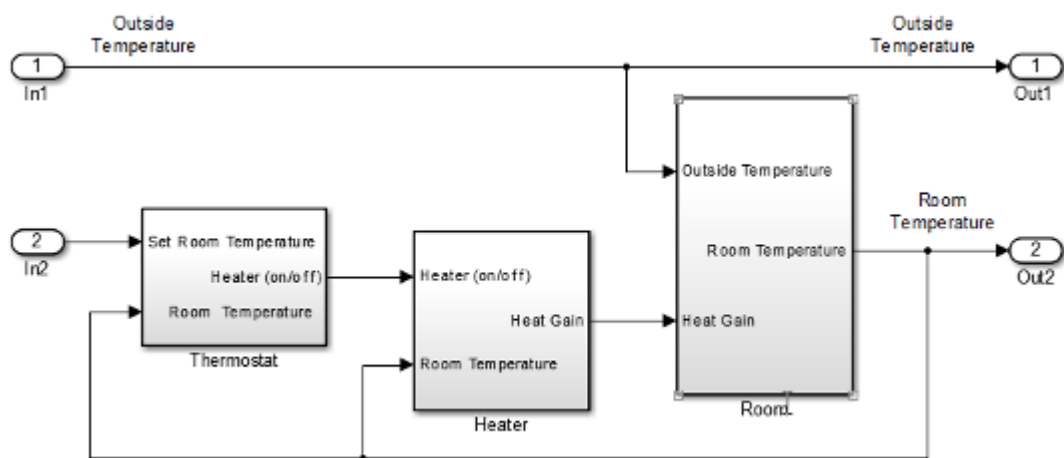


Рисунок 1.2 – Приклад використання MATLAB з модулем Simulink

Однією з ключових переваг MATLAB є його широкий функціонал, який дозволяє виконувати різноманітні обчислення, від базових математичних операцій до складних чисельних алгоритмів. Використання MATLAB з модулем Simulink у сфері теплообміну дозволяє дослідникам створювати динамічні моделі систем та проводити їх імітацію для аналізу та оптимізації. Модуль Simulink надає зручне середовище для побудови блочних схем, яке

спрощує процес моделювання складних систем. Це дозволяє користувачам візуалізувати та аналізувати взаємозв'язки між різними компонентами системи теплообміну, допомагаючи зрозуміти їх вплив на загальну продуктивність системи. Завдяки своїй гнучкості та широкому спектру функцій, MATLAB з модулем Simulink може бути використаний для моделювання різноманітних теплообмінних процесів, включаючи аналіз теплових потоків, взаємодію теплоносіїв, та оптимізацію конструкцій теплообмінних пристроїв [2].

OpenFOAM (Рисунок 1.3) є відкритим програмним пакетом для обчислювальної гідродинаміки (CFD) та теплообміну, який надає користувачам гнучкість та можливість налаштування для моделювання різноманітних фізичних процесів.

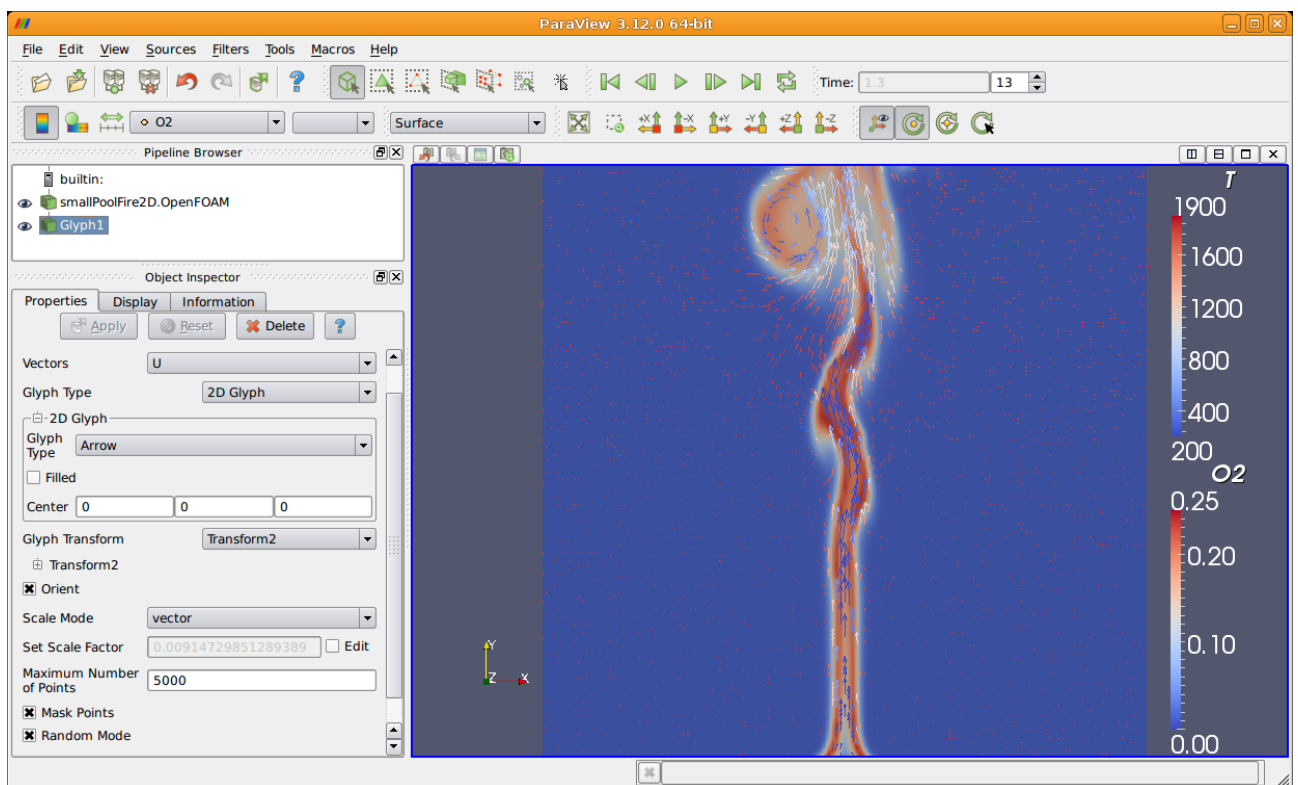


Рисунок 1.3 – Приклад використання OpenFOAM

Відкрита природа цього пакету дозволяє дослідникам та інженерам усього світу вносити пропозиції у його розвиток та використовувати для рішення різноманітних завдань у галузі теплообміну та гідродинаміки. Основні

переваги OpenFOAM включають його здатність моделювати широкий спектр теплообмінних процесів, від простих течій рідин до складних турбулентних потоків. Це дозволяє дослідникам досліджувати вплив різних факторів, таких як геометрія системи, фізичні властивості та умови оточення, на ефективність теплообміну та гідродинамічні процеси. OpenFOAM надає широкі можливості для визначення та встановлення різноманітних граничних умов, які дозволяють точно відтворювати реальні умови експлуатації системи теплообміну. Він також має широкий спектр моделей турбулентності, які дозволяють враховувати складні ефекти турбулентності в теплообмінних системах, що є важливим для точного моделювання реальних умов роботи систем [3].

Таким чином, один з ключових аспектів в порівнянні OpenFOAM і MATLAB з модулем Simulink полягає в їхній структурі та призначенні. OpenFOAM, як відкритий програмний пакет, надає користувачам велику гнучкість та можливості для налаштування, що робить його ідеальним інструментом для детального аналізу та моделювання складних теплообмінних систем і гідродинамічних процесів. З іншого боку, MATLAB з модулем Simulink відомий своєю зручністю в використанні та широким спектром аналітичних інструментів, що дозволяє користувачам ефективно аналізувати дані та створювати динамічні моделі систем теплообміну.

Другим аспектом можна зазначити, що OpenFOAM відзначається своєю здатністю моделювати турбулентні потоки та складні теплообмінні процеси з високою точністю, що робить його популярним інструментом серед спеціалістів у галузі гідродинаміки. Натомість, MATLAB з модулем Simulink відомий своєю широкою функціональністю та можливістю аналізу даних, що робить його цінним інструментом для рішення широкого спектру завдань у галузі теплообміну та моделювання фізичних процесів.

Але найбільш відомими і використаними з програмних пакетів для КМ є пакети комп'ютерних програм ANSYS [4] та COMSOL Multiphysics [5]. Ці програми дозволяють виконувати розрахунки методом кінцевих елементів для

багатьох процесів і явищ. Модулі та функції, доступні користувачеві, істотно розширюють їхні можливості.

ANSYS включає в себе вбудовану мову програмування APDL (ANSYS Parametric Design Language), тоді як у COMSOL Multiphysics можна програмувати за допомогою мови, аналогічної мові Matlab (оскільки раніше COMSOL Multiphysics був інтегрований з Matlab і був його модулем Femlab). Обидва пакети, ANSYS і COMSOL Multiphysics, мають подібний графічний інтерфейс і забезпечують можливість вирішення різноманітних наукових та інженерних задач. У них вбудовані модулі для розв'язання різних пов'язаних проблем, включаючи розрахунки пов'язаних з пружно-гідродинамічними задачами, при цьому обчислювальна сітка може бути рухливою, а для моделювання використовується ALE-формулювання. Обидва програмних пакети дозволяють створювати трикутні і чотирикутні кінцево-різницеві сітки.

Основна відмінність ANSYS і COMSOL Multiphysics полягає в їх концепції (Рисунок 1.4).

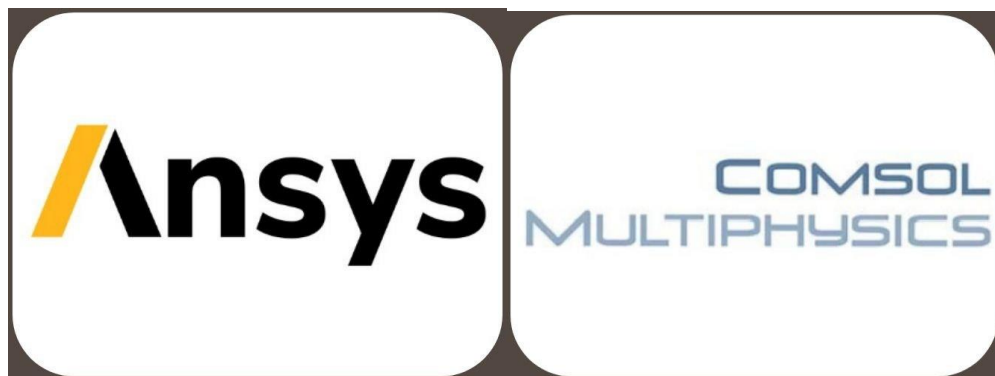


Рисунок 1.4 – Мультифізичні платформи ANSYS та COMSOL Multiphysics

У COMSOL Multiphysics завжди, використовуючи будь-який модуль, користувачеві чітко відома постановка задачі, тобто рівняння, що описують процес, і крайові умови виражені явно. У ANSYS, навпаки, математична постановка залишається прихованою від користувача. Інженер не має прямого

доступу до рівнянь і крайових умов у тому форматі, в якому звикли працювати фізики і математики. У ANSYS вибір елемента визначає вибір рівнянь, що описують процес. У COMSOL Multiphysics вибір елемента не вносить зобов'язань, і рівняння задаються окремо при виборі модуля або встановленні їхніх коефіцієнтів і констант.

Якщо порівнювати COMSOL Multiphysics та ANSYS зі згаданими раніше OpenFOAM і MATLAB з модулем Simulink, то можна сказати, що останні два є більш доступними програмними пакетами, що можуть бути більш підходящими для менших команд дослідників або тих, хто працює з обмеженими бюджетними ресурсами. COMSOL Multiphysics та ANSYS, в свою чергу, мають більший комерційний успіх та широко застосовуються в інженерній практиці. Вони часто використовуються в промислових компаніях та дослідницьких установах для вирішення складних інженерних проблем.

У підсумку, обидва комерційні пакети, COMSOL Multiphysics та ANSYS, та відкриті пакети, OpenFOAM і MATLAB з модулем Simulink, мають свої унікальні переваги та особливості, які роблять їх популярними серед спеціалістів у сфері теплообміну та гідродинаміки, в залежності від конкретних потреб користувача.

В рамках даної роботи ми зупинимося на більш детальному огляді програмних пакетів COMSOL Multiphysics та ANSYS.

### 1.3. Програмний пакет COMSOL Multiphysics

Завдяки програмному пакету COMSOL Multiphysics, інженери та вчені можуть моделювати процеси, пристрої та конструкції у всіх сферах інженерних, виробничих та наукових досліджень. COMSOL Multiphysics дозволяє ефективно моделювати та аналізувати явища теплопередачі, термодинаміки, електрики та електромагнетизму, а також механічні характеристики різноманітних матеріалів. Це відкриває безліч можливостей для покращення проектів і технологій в різних галузях, від промисловості до медицини та науки.

COMSOL Multiphysics представляє собою інтегровану платформу для моделювання, що охоплює всі етапи від створення геометрії, визначення механічних властивостей матеріалів і опису фізичних явищ до налаштування вирішувачів і обробки результатів, гарантуючи отримання точних і надійних результатів.

Для створення моделей в COMSOL Multiphysics для спеціалізованих прикладних та інженерних задач користувач може розширювати можливості цього програмного пакету за допомогою модулів у будь-якому їх поєднанні. Модулі інтеграції дозволяють використовувати при моделюванні інші інженерні та математичні програми, що використовуються при розробці пристроїв та дослідженні процесів. Після створення моделі користувач може перетворити її в додаток для моделювання зі спеціалізованим інтерфейсом [6].

У програмному пакеті COMSOL Multiphysics важливу роль відіграє зручний інтерфейс (Рисунок 1.5), який дозволяє користувачам легко та ефективно працювати з різноманітними інструментами моделювання. Інтерфейс COMSOL Multiphysics побудований з урахуванням потреб інженерів і вчених, що дозволяє швидко орієнтуватися в програмі та використовувати її потужні можливості для вирішення складних технічних завдань.

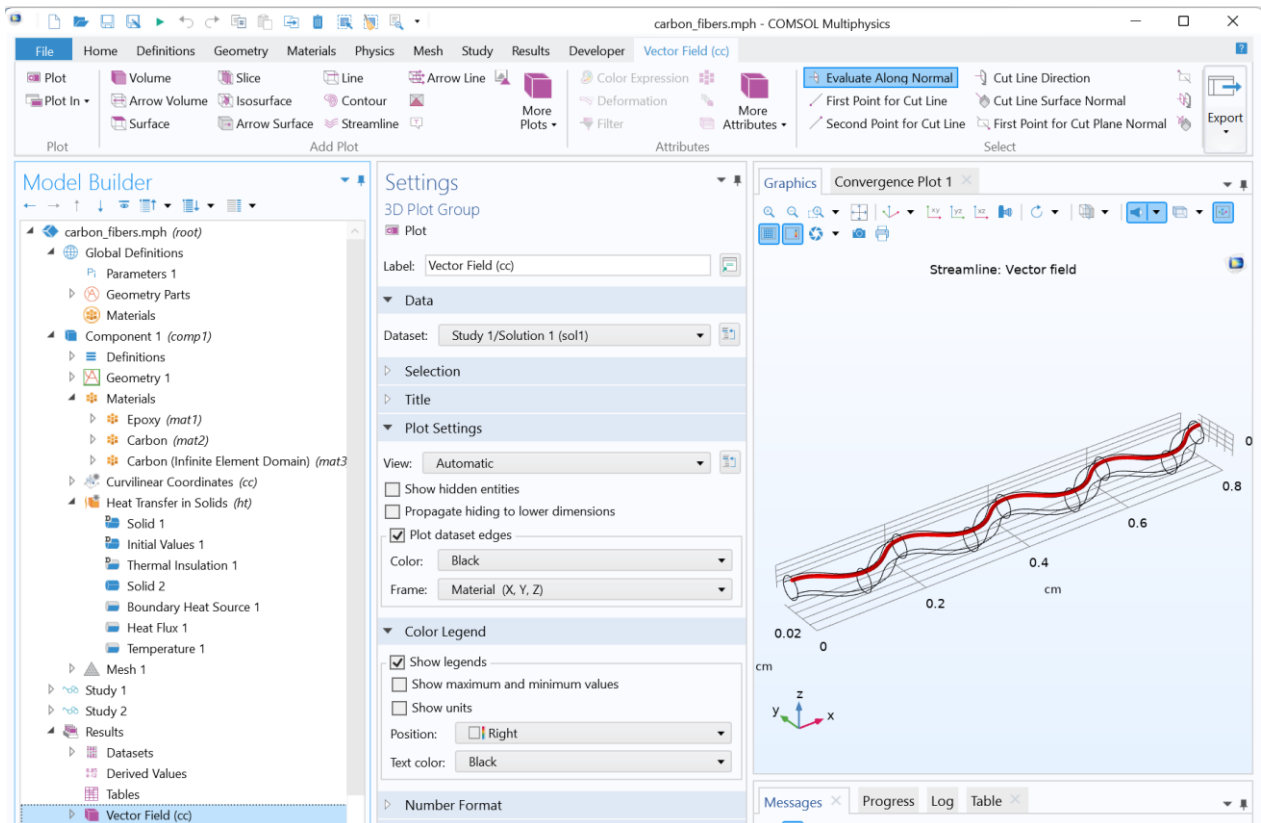


Рисунок 1.5 – Інтерфейс програмного пакету COMSOL Multiphysics 6.1 і модель вуглецевих волокон з вбудованої бібліотеки моделей

Завдяки інтуїтивно зрозумілому інтерфейсу користувачі можуть швидко знаходити потрібні інструменти та функції для налаштування своїх моделей. Графічне представлення параметрів, налаштувань та результатів обчислень дозволяє візуалізувати складні дані та результати аналізу зручним для сприйняття способом.

Крім того, інтерфейс COMSOL Multiphysics дозволяє використовувати готові шаблони та моделі (на Рисунку 1.5 представлено модель вуглецевих волокон з вбудованої бібліотеки моделей) для швидкого старту роботи над проектами. Це дозволяє ефективно використовувати програмний пакет навіть для складних технічних завдань без необхідності глибокого розуміння всіх математичних деталей інженерних розрахунків.

У програмному пакеті COMSOL Multiphysics розрахункова сітка (Рисунок 1.6) є одним із ключових елементів, який використовується для наближеного розрахунку чисельних рішень. Вона використовується для апроксимації



диференціальних рівнянь, що моделюють фізичні процеси, на кінцевому наборі точок. Задача створення оптимальної розрахункової сітки є ключовою для досягнення точних та надійних результатів.

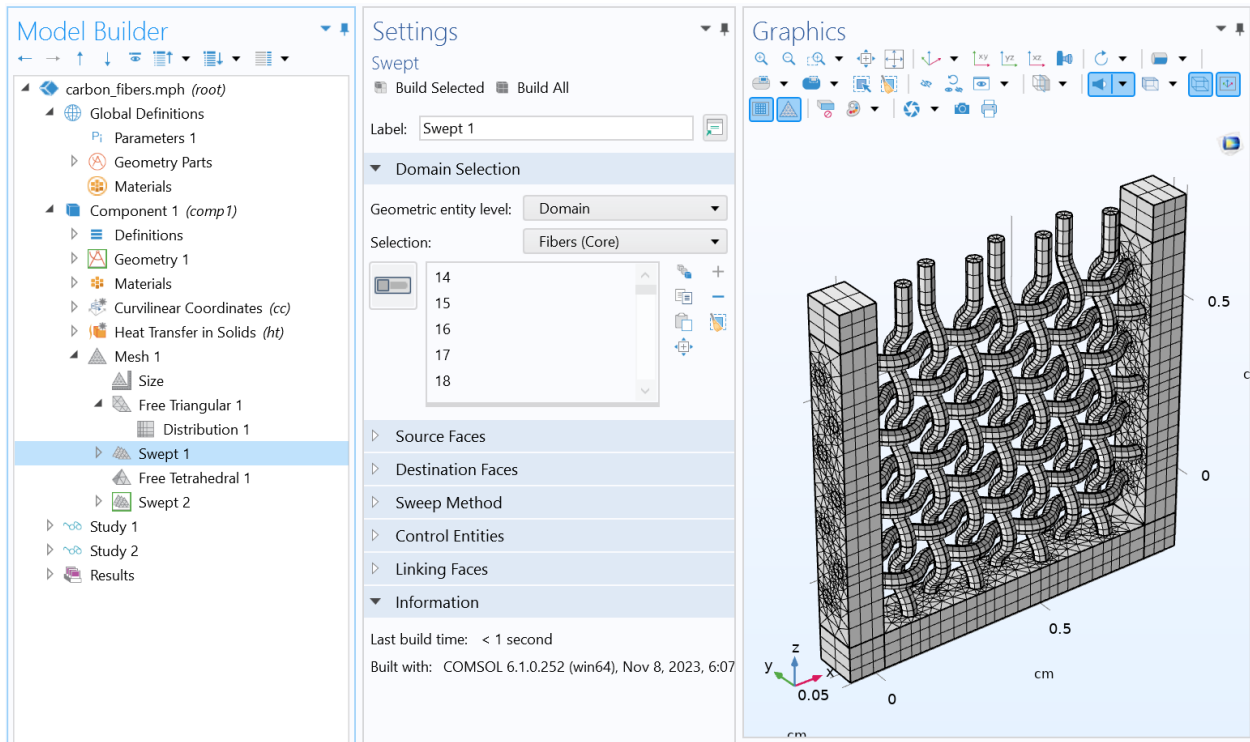


Рисунок 1.6 – Розрахункова сітка у COMSOL Multiphysics 6.1

COMSOL Multiphysics надає користувачеві можливість контролювати розрахункову сітку через різноманітні параметри, такі як розмір елементів, густота сітки та метод апроксимації. Це дозволяє робити розрахунки більш точними або ефективними в залежності від конкретних вимог та обмежень задачі. Крім того, COMSOL Multiphysics надає можливість використовувати різні види розрахункових сіток, такі як структуровані, неструктуровані, адаптивні тощо, для досягнення оптимальної збалансованості між точністю результатів і обчислювальною складністю.

Успішні інженерні розрахунки часто базуються на експериментально підтверджених моделях, які можуть в певній мірі замінити фізичні експерименти та прототипування, дозволяючи краще розуміти конструкцію чи процес. Порівняно з проведенням фізичних експериментів та тестуванням

прототипів, моделювання дозволяє швидше, ефективніше і точніше оптимізувати процеси і пристрої.

Користувачі COMSOL Multiphysics вільні від жорстких обмежень, які зазвичай властиві пакетам для моделювання, і можуть керувати усіма аспектами моделі. Пакет надає можливість творчо підходити до моделювання і вирішувати завдання, складні або неможливі при звичайному підході, поєднуючи довільне число фізичних явищ, рівнянь і виразів через графічний інтерфейс (GUI).

Користувачі COMSOL Multiphysics не обмежені жорсткими рамками, характерними для багатьох пакетів моделювання, і можуть керувати усіма аспектами моделі. Пакет надає можливість творчого підходу до моделювання та розв'язку задач, які є складними або неможливими для розв'язування за звичайного підходу, через графічний інтерфейс (GUI) з поєднанням довільного числа фізичних явищ, рівнянь і виразів.

COMSOL Multiphysics підтримує імпорт всіх стандартних CAD і ECAD файлів за наявності модулів Імпорт даних з CAD і Імпорт даних з ECAD відповідно. Модуль Проектування розширює набір геометричних операцій, що доступні в COMSOL Multiphysics. Модулі Імпорт даних з CAD і Проектування дозволяють виправляти геометрію і видаляти деякі зайві деталі за допомогою операцій Defeaturing і Repair. Моделі на основі поверхневих сіток (наприклад, у форматі STL) можна імпортувати та перетворювати в геометричні об'єкти за допомогою базової платформи COMSOL Multiphysics. Операції імпорту функціонують так само, як і всі інші геометричні операції, і дозволяють використовувати вибірки, а також асоціативність при параметричних і оптимізаційних дослідженнях.

Додатково, порівняно з операціями Defeaturing і Repair, COMSOL включає віртуальні операції, які дозволяють усунути вплив ряду геометричних артефактів на кінцево-елементну сітку, не змінюючи точність геометрії [6].

На кафедрі загальної фізики та моделювання фізичних процесів, здобувачі вищої освіти отримують знання з комп'ютерного моделювання фізичних процесів на базі саме програмного пакету COMSOL Multiphysics.

## 1.4. Програмний пакет ANSYS

Одним із актуальних напрямів досліджень у теперішній час є дослідження процесів горіння в сучасних теплообмінних апаратах, з використанням програмного пакету ANSYS (Рисунок 1.7). На етапі вибору теми для магістерської дисертації, автору було запропоновано прийняти участь у проведенні моделювання роботи водогрійного котла щодо можливості його експлуатації на різних типах паливних пелетів і розподілом температур в топці та елементах газового тракту, що може надати можливість додатково опанувати програмний пакет ANSYS, який схожий з платформою COMSOL Multiphysics.



Рисунок 1.7 – Логотип програми ANSYS

У погодженні з науковим керівником, автор обрав тему досліджень, де моделювання процесів теплообміну буде виконано в програмі ANSYS, що на думку автора розширить його світогляд і дасть додаткові можливості при працевлаштуванні.

Програмний комплекс ANSYS є лідером в області CAE - програм скінчено-елементного аналізу і має майже сорокалітній досвід у розв'язуванні прикладних задач за допомоги чисельних методів. Протягом цього періоду ANSYS Inc., продовжуючи удосконалювати свої технології, розробляє гнучкі та

зручні системи чисельного моделювання для різних сфер виробництва. Це надає можливість різним компаніям проводити повноцінний аналіз своїх проектів і досягати максимальної ефективності витрат на обчислювальну техніку та програмне забезпечення.

Важливо відзначити, що у ANSYS Inc. велика увага приділяється вирішенню проблеми ефективної інтеграції різних програмних комплексів інженерного аналізу в єдине розрахункове середовище для повного розкриття можливостей міждисциплінарного зв'язаного аналізу. Зокрема, з введенням 10-ї версії, ANSYS Inc. представила нову платформу WorkBench, яка має сучасний графічний інтерфейс і дозволяє ефективно управляти окремими модулями та продуктами ANSYS.

За допомогою WorkBench практично весь комплекс програмних продуктів ANSYS може бути інтегрованим з потужними CAD-системами, такими як SolidWorks, Unigraphics, Inventor, у єдино розрахунково-проектувальне середовище. ANSYS, аналогічно багатьом іншим CAE-системам для математичного моделювання фізичних процесів, використовує метод скінчених елементів, що поєднує універсальність алгоритмів розв'язання крайових задач з ефективністю комп'ютерної реалізації обчислень.

На сьогоднішній день ANSYS широко використовується в університетах для навчання студентів і виконання науково-дослідних робіт. Серед його переваг варто відзначити багатоцільовий характер програми, незалежність від апаратних засобів (від персональних комп'ютерів до робочих станцій і суперкомп'ютерів), використання передових засобів геометричного моделювання на базі сплайнів (технологія NURBS) та повну сумісність з CAD / CAM / CAE системами провідних виробників.

ANSYS-Fluent – це програма для розрахунку параметрів течії та теплообміну у складних механізмах та пристроях. Це комплексне рішення для моделювання гідродинамічних та теплообмінних процесів у трубопроводах, турбінах, турбонагнітачах, системах охолодження, суднових корпусах, водогрійних котлах тощо.

Програмний пакет ANSYS-Fluent дозволяє інженерам аналізувати, проектувати та оптимізувати складні системи для оптимізації їхньої ефективності. Наприклад, можна створювати моделі проточних камер для вимірювання турбулентності, обчислювати параметри потоку в деталях двигуна, розрахунок ступеня охолодження окремих ділянок гідроагрегатів та багато іншого [7].

Однією з основних переваг використання пакета ANSYS-Fluent є можливість проведення точних чисельних розрахунків, які враховують вплив різних фізичних параметрів на процес течії. Програмний пакет враховує ряд параметрів, таких як ступінь в'язкості, турбулентність, температуру, тиск та інші.

Інший важливий аспект використання ANSYS-Fluent – це можливість створення реалістичних графічних моделей (Рисунок 1.8) систем та пристроїв. Інженери можуть створювати 3D-моделі, які дозволяють їм краще зрозуміти процеси гідродинаміки та теплообміну, а також оптимізувати систему для підвищення її ефективності.

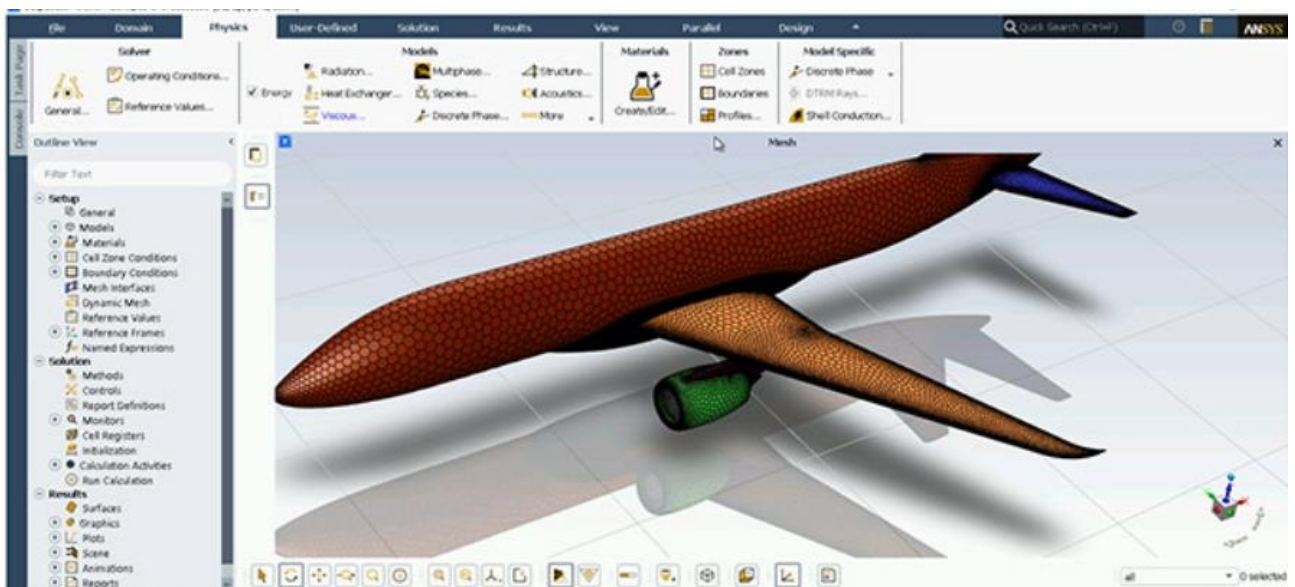


Рисунок 1.8 – Реалістична модель в ANSYS-Fluent

ANSYS Fluent – це потужний та універсальний інженерний інструмент для обчислювального моделювання різних теплофізичних процесів, включаючи горіння. Він надає багато функціональних можливостей, що дозволяють враховувати різні аспекти горіння, такі як теплообмін, турбулентність, хімічні реакції, та інші [8].

У горінні важливо враховувати теплообмін між газами та поверхнею твердих тіл, такими як пелети пального та стінки котла. ANSYS Fluent має розширені можливості для моделювання теплообміну, включаючи розрахунок теплового випромінювання та конвекційний теплообмін.

Процеси горіння часто включають турбулентний потік газів і твердих частинок. ANSYS Fluent забезпечує можливість детального моделювання турбулентності, використовуючи різні моделі турбулентності, такі як модель  $k-\epsilon$  та Large Eddy Simulation (LES).

ANSYS Fluent використовує об'ємні скінченно-елементні методи (FEM) для розв'язання різних задач в галузі теплопередачі, гідродинаміки та інших. Скінчено-елементний метод в якості числового методу наближення широко використовується для розрахунків поведінки різноманітних об'єктів у фізичних експериментах та технічних моделях.

У контексті Fluent, сітка представляє собою набір об'ємних елементів, що допомагають апроксимувати неперервні функції у просторі. Вона дозволяє розбити простір на менші області, які називаються скінченними елементами, і вирішувати рівняння для кожного з цих елементів окремо. Цей підхід дозволяє зближуватися до точного розв'язку при аналізі складних задач гідродинаміки та теплообміну.

Одним з ключових елементів в роботі з Fluent є гнучка система генерації сіток. Вона дозволяє створювати різні типи сіток, такі як структуровані та неструктуровані сітки, а також адаптивні сітки, що допомагають ефективно моделювати складні геометрії та потоки. Більш складні сітки можуть включати тисячі і навіть мільйони елементів, що забезпечує високу точність та адекватність розв'язку для широкого спектру інженерних завдань. На Рисунку

1.9 наведено скінченно-елементну сітку моделі гвинтоподібної труби з різними кроками гвинтової лінії [9].

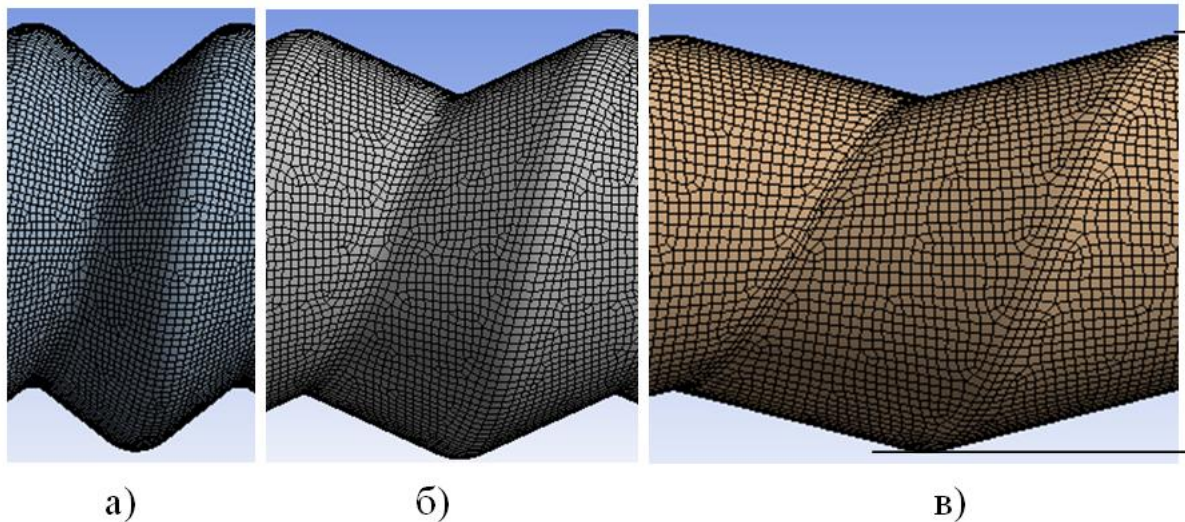


Рисунок 1.9 – Скінченно-елементна сітка моделі гвинтоподібної труби з кроком гвинтової лінії 8 мм (а), 12 мм (б) і 20 мм (в)

Об'єднання тетраедричних скінчених елементів в шестигранні надає можливість заощадити об'єм оперативної пам'яті комп'ютера при проведенні розрахунків.

Для точного моделювання процесів горіння необхідно враховувати хімічні реакції, які відбуваються між пальними газами та киснем. ANSYS Fluent дозволяє визначити хімічні реакції та кінетику горіння за допомогою різних моделей.

ANSYS Fluent оптимізований для швидкого вирішення складних обчислювальних завдань. Він підтримує паралельні обчислення, що дозволяє використовувати великі кластери обчислювальних серверів для швидкого моделювання.

ANSYS Fluent легко інтегрується з іншими інженерними програмами, що дозволяє використовувати його в комплексних проектах. Це особливо корисно при розробці та аналізі систем опалення та енергетичних установок, де необхідно враховувати взаємодію різних компонентів.



Порівнюючи ANSYS-Fluent і COMSOL Multiphysics, можна сказати, що перший пакет є більш спеціалізованим у галузі розрахунків течій, забезпечуючи високу точність результатів і широкий вибір турбулентних моделей. У той же час COMSOL Multiphysics має широкий спектр фізичних моделей, що робить його більш універсальним інструментом для дослідження різних фізичних процесів. Обидва пакети забезпечують високу точність та швидкість розрахунків, а також мають відкриті програмні інтерфейси для інтеграції з іншими програмами. Остаточний вибір пакета буде залежати від конкретного завдання та вимог користувача.

Так як дана робота пов'язана з гідродинамікою та теплопередачею, для побудови моделі автором було обрано обчислювальний пакет ANSYS-Fluent.

В цілому, ANSYS-Fluent є потужним інструментом для інженерів та наукових дослідників, що дозволяє провести точний аналіз течії та теплообміну для визначення найбільш оптимальних умов для роботи складних систем.

З урахуванням вищеописаних факторів ANSYS Fluent стає перевагою для моделювання процесів горіння в автоматичних пелетних котлах, дозволяючи отримати точні та надійні результати для оптимізації ефективності та безпеки горіння.

## Висновки до першого розділу

1. Визначено, що комп'ютерне моделювання надає можливість чітко розуміти, проектувати і оптимізувати процеси і пристрої з урахуванням реальних умов їх роботи. З а допомогою моделей, які відповідають поставленим завданням, можна враховувати широкий діапазон умов експлуатації і різні фізичні явища.

2. Показано, що у теперішній час існує багато комп'ютерних програм для моделювання фізичних процесів і явищ, які мають свої переваги і недоліки що надає можливість науковцям і інженерам використовувати їх для вирішення конкретних завдань.

3. Обґрунтовано, що для обчислювального моделювання різних теплофізичних процесів, включаючи горіння, що є об'єктом досліджень даної роботи, автором обрано програмний пакет ANSYS Fluent. Цей програмний пакет має розширені можливості для моделювання теплообміну, включаючи розрахунок теплового випромінювання та конвекційний теплообмін.

## РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ПРОЦЕСІВ ГОРІННЯ

### 2.1. Вступ до теорії горіння

Зазвичай вважається, що горіння – це будь-яка хімічна реакція, яка швидко протікає та супроводжується виділенням тепла і світла. З цієї точки зору речовини можуть «горіти» не лише в кисні. Наприклад, багато металів «горять» у хлорі, оксиди натрію і барію «горять» у вуглекислому газі, порох «горить» без участі газового середовища тощо. У вузькому сенсі слова горіння представляє собою реакцію з'єднання речовини з киснем. В більшій або меншій мірі майже всі речовини піддаються горінню. Повільне окиснення також іноді називають повільним горінням.

Процес горіння (Рисунок 2.1) належить до числа тих небагатьох явищ природи, відкриття яких відноситься до самого раннього періоду історії людства. Використання вогню поклало початок оволодінню силами природи і в подальшому розвитку цивілізації відіграло особливу роль у ході технічного прогресу.



Рисунок 2.1 – Процес горіння

Горіння і вогонь сприяли початковому раціональному мисленню людини. Значення вогню стало особливо важливим, коли разом з його використанням переважно для побутових і технологічних потреб горіння стало засобом виробництва механічної роботи. З цього моменту люди змусили природні сили служити собі, спочатку одиницями і сотнями, а потім сотнями тисяч і мільйонами одиниць механічних сил. Усе це призвело до високого рівня енергозабезпеченості, який характеризує сучасний стан техніки.

У середньовіччі питання про процеси горіння особливо привертало увагу хіміків. На початку XVIII століття була зроблена перша спроба об'єднати всі хімічні факти на основі однієї гіпотези та систематизувати їх за допомогою теорії флогістона. Згідно з цією теорією, всі речовини, здатні горіти або змінюватися під впливом вогню, містять особливу речовину вогню – флогістон. Ця теорія, яку підтримували всі хіміки того часу, домінувала протягом цілого століття [10].

У 17 столітті горіння розглядалося як з'єднання горючої речовини з "важкими частинками повітря" (склад повітря тоді ще не був відомий). Експериментами з нагрівання металу в запаяних ретортах було визначено роль повітря у горінні [11, 12], та остаточно сформулював основний закон збереження речовини, який став основою сучасної хімії [10, 13].

У 1773 році Антуан Лавуазьє [14] повторив експерименти з проколюванням металів, і прийшов до пояснення горіння як з'єднання речовини з киснем, тобто до основи сучасних уявлень про явища горіння. Завдяки працям Лавуазьє теорія флогістона була спростована, і після цього її замінила інша – киснева теорія горіння. Слід зауважити, що в радянських джерелах першість у спростуванні теорії флогістона приписують М.В. Ломоносову на підставі згаданих вище робіт.

З моменту виникнення кисневої теорії горіння наші знання в цій області значно покращилися, а в практичній сфері послужили основою для створення

різноманітних методів проведення технічних процесів спалювання з різними цілями, в основному для виробництва енергії.

Добре відомо, що у топках електростанцій згорають тверде, рідке і газоподібне паливо, причому сучасні топкові пристрої досягли великих потужностей та досить високого ступеня досконалості відносно максимальної повноти згорання.

Двигуни внутрішнього згорання (Рисунок 2.2), які отримали швидкий розвиток протягом першої половини ХХ століття, використовують процес горіння газів, або паро- і рідкопаливних речовин, і є енергетичною основою авіаційного та автомобільного транспорту. Ефективність реактивних пристроїв ще більше залежить від методів згорання пального, які використовуються у цих двигунах.

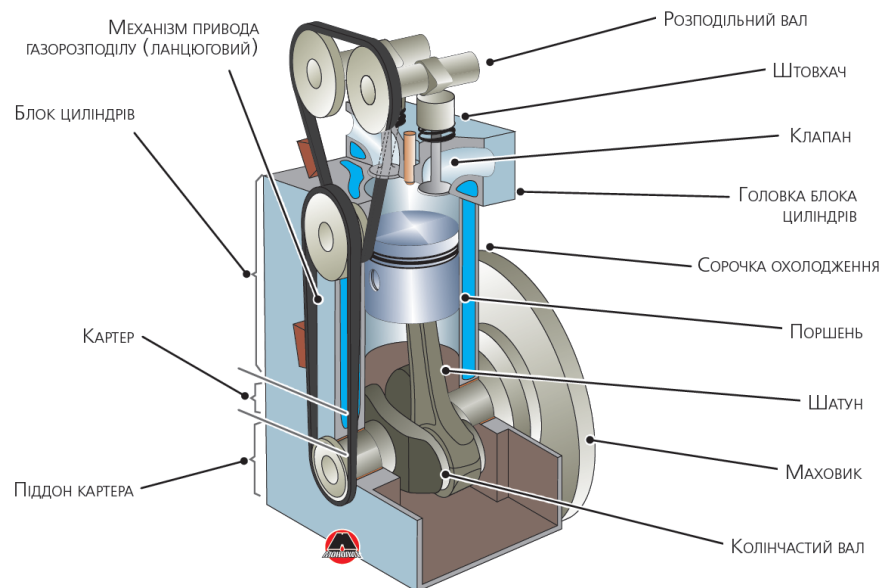


Рисунок 2.2 – Найпростіші двигуни внутрішнього згорання

На практиці, вся військова енергетика – артилерія та інші засоби руйнування, які працюють зі звичайними вибуховими речовинами, – ґрунтується на використанні явища горіння.

Широко використовується процес горіння і в різних виробничих галузях – для організації різних хімічних, металургійних та інших процесів, які вимагають відповідних температурних умов.

Знання властивостей та законів горіння різних речовин є дуже важливими, оскільки у всіх галузях техніки в наш час стоять завдання всебічного підвищення продуктивності процесів.

Велику область явищ горіння можна розділити в основному на три групи:

- горіння газоподібних горючих – гомогенне горіння (в системі газ + газ);
- горіння твердих і рідких горючих – гетерогенне горіння (у системах тверде тіло + газ або рідина + газ);
- горіння вибухових речовин – конденсовані системи.

Велике значення також має горіння систем рідина-горюча речовина + рідина-окислювач (Рисунок 2.3). Залежно від властивостей кожного з таких компонентів їх можна віднести до першої або другої групи [15].

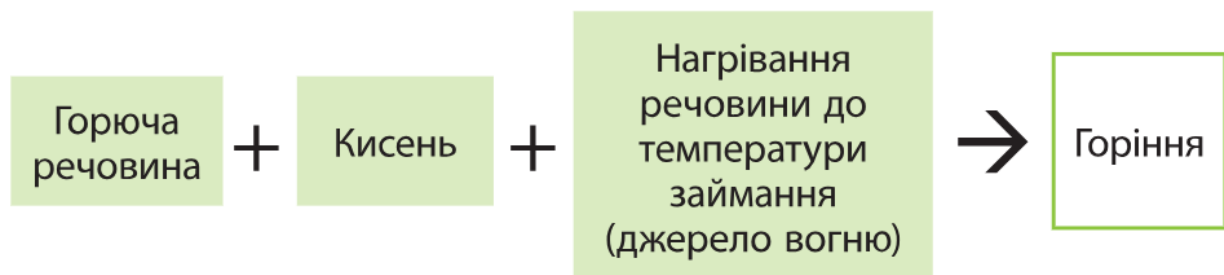


Рисунок 2.3 – Умови процесу горіння

Кожний процес горіння або розкладання речовини насамперед є хімічним процесом, оскільки він супроводжується перетворенням речовини та зміною її якості. Вивчення законів сполук, перетворень та виявлень необхідних для цього умов складає суть хімічної науки. Хімія використовує правила валентності, теорію будови та хімічну термодинаміку як засоби. Вони вказують напрямок та

глибину реакції. Однак цей розділ хімії не надає нам інформації про швидкості перетворень. Для цього необхідно знання деяких нових властивостей горючої речовини – її динамічних властивостей, які проявляються лише в процесі перетворення. При ближчому розгляді цього питання виявляється, що в багатьох важливих практичних випадках спостережені і використовувані нами процеси горіння передусім підпорядковані чисто фізичним законам. Це стосується до того, що хімічне перетворення, як таке, при певних умовах, наприклад, при високій температурі, може відбуватися з дуже великою швидкістю. Проте розвиток хімічного перетворення не відбувається ізольовано та незалежно від реального фізичного оточення і супроводжується різними фізичними явищами, які розвиваються згідно зі своїми законами. Тому хімічний процес у своєму розвитку в основному підпорядковується таким фізичним процесам, як теплопередача, дифузія і інші, і ними регулюється. Іншими словами, це означає, що певне хімічне перетворення, маючи великий потенціал щодо швидкості його відбування, насправді характеризується досить обмеженою швидкістю і, крім того, підпорядковується закономірностям одного з обмежуючих фізичних явищ, а не чисто хімічним кінетичним законам. Наприклад, це може стосуватися горіння вугільної частинки (Рисунок 2.4) при достатньо високій температурі, коли хімічна реакційна активність вуглецю дуже висока. У цьому випадку швидкість горіння буде визначатися не тим, з якою швидкістю міг би реагувати вуглець, а тим, з якою швидкістю кисень буде надходити до вугільної частинки з навколишнього простору. Постачання кисню, наприклад, у нерухомому повітрі може відбуватися лише за допомогою дифузії. Цей чисто фізичний процес має порівняно невеликі швидкості, і саме ці швидкості головним чином визначатимуть швидкість горіння вугільної частинки при високій температурі [15].

Основоположниками сучасної теорії нормального горіння газу є французькі вчені Малляр і Ле-Шательє [16-18], а також фізик В. А. Михельсон (Рисунок 2.4) [19, 20]. Вже в 1890 році Михельсон провів глибокий аналіз цього процесу в трубах і розробив теорію полум'я на пальнику Бунзена, а також

теоретично обґрунтував відомий метод вимірювання нормальних швидкостей полум'я за допомогою пальника.



Рисунок 2.4 – фізик Міхельсон Володимир Олександрович

Михельсон також висловив важливі погляди щодо механізму поширення детонації [21]. Декілька років потому Жуге [22] і Чемпен [23] представили гідродинамічну теорію детонації, проте в роботі останнього залишився невирішеним ключовий питання обґрунтування того єдиного режиму, який відповідає спостережуваному в експерименті. Розв'язання цієї задачі знайшов пізніше Я. Б. Зельдович [24-26].

У 1931 році академіком Семеновим (Рисунок 2.5) був створений науковий дослідницький інститут хімічної фізики, де протягом короткого періоду (10-15 років) були проведені дуже важливі дослідження у сфері вивчення процесів запалення та горіння газів, і були закладені основи теорії основних явищ горіння, такі як кінетика ланцюгових реакцій [27], теорія теплового samozаймання [28, 29], теорія поширення нормального горіння [30] і інше.



Також відомі роботи академіка Кондратьєва [31] у галузі спектроскопічного вивчення газових хімічних реакцій і роботи Зельдовича з теорії поширення полум'я [32-34].

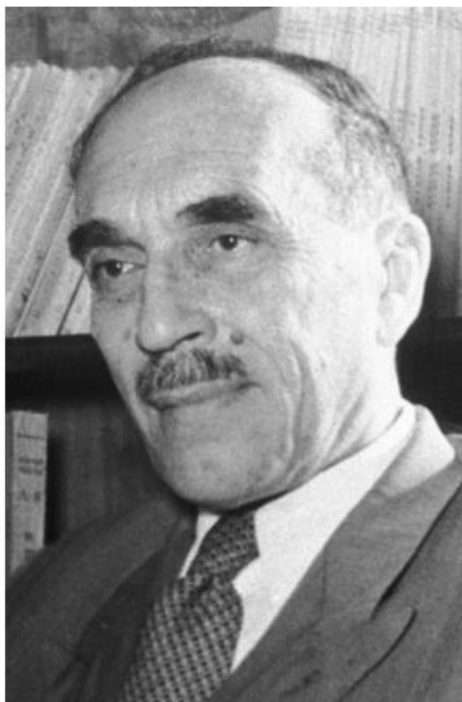


Рисунок 2.5 – Академік Миколай Миколайович Семенов

Теорія ланцюгових реакцій, розроблена академіком Семеновим, пізніше отримала світове визнання і високу оцінку у вигляді присудження йому Нобелівської премії [35].

У першій половині ХХ століття інтенсивні дослідження у галузі горіння відбувалися за кордоном. Особливо це стосується США, де працювали численні наукові і дослідницькі інститути та університети з великою кількістю фізиків, хіміків і інженерів. Велику роль у дослідженнях горіння також відіграли Англія, Франція, Японія та Німеччина.

Систематично проводилися дослідження для створення загальних монографій з горіння. Відомо багато важливих праць, що були опубліковані протягом першої половини ХХ століття. Після важливої монографії У. Бона [36] "Полум'я і горіння в газах" (1927), яка відіграла значущу роль у розвитку

дослідження горіння газів, з'явилися монографії Б. Льюїса і Г. Ельбе [37] "Горіння, полум'я і вибухи в газах" (1938) та В. Йоста [38] "Вибухи і горіння в газах" (1939), які систематизували та аналізували основні експериментальні факти під певним кутом зору. У 1951 році вийшла нова монографія Льюїса і Ельбе [39] з тією самою назвою, але вона була значно перероблена та розширена, охоплюючи ряд явищ горіння, які раніше були мало теоретично вивчені. Дуже цікавою і оригінальною є також монографія Гейдона [40] "Спектроскопія і теорія горіння" (1948) та його спільна робота з Вольфхартом [41], яка вийшла у 1953 році під назвою "Полум'я, його структура, випромінювання та температура". У цих роботах розглядаються питання механізму поширення полум'я, дифузійні та нестійкі види полум'я, випромінювання, температура та іонізація полум'я, а також утворення твердого вуглецю в полум'ї.

Наука про горіння продовжує розвиватися. Останнім часом з'явилися нові напрямки у науці про горіння і технології, що базуються на ній. Одним із них є саморозповсюджуючийся високотемпературний синтез – процес руху хімічної реакції по суміші твердих дисперсних реагентів з утворенням твердих кінцевих продуктів. Ця технологія дозволяє синтезувати нові матеріали і речовини з особливими властивостями. Також існує цілий ряд інших технологій, кількість яких постійно зростає, де процеси горіння та вибуху відіграють визначальну роль.

Незважаючи на довгу історію, кількісний опис процесів горіння почав розвиватися відносно нещодавно. Це пов'язано зі складністю явища, яке включає в себе цілий ряд хімічних реакцій, а також такі аспекти, як рух газу, теплопровідність і дифузійний перенос речовини. Останнім часом експериментальна техніка і техніка комп'ютерного моделювання досягли такого високого рівня, що багато проблем горіння можуть бути описані кількісно.

## 2.2. Фізичні основи процесів горіння

Горіння – це складний фізико-хімічний процес, під час якого перетворення речовини супроводжується інтенсивним виділенням тепла, яскравим світінням і тепломасообміном з навколишнім середовищем.

Згідно з сучасною фізико-хімічною теорією горіння, процес горіння – це реакції, пов'язані з швидким перетворенням та тепловим або дифузійним прискоренням.

Основою процесу горіння є хімічне перетворення (реакція), пов'язане з виділенням тепла. Хімічне перетворення в процесі свого розвитку часто викликає появу різних фізичних процесів: теплопереносу, переносу реагуючих речовин і так далі. При прогресивному розвитку та прискоренні реакції ці процеси на певному етапі, стають основними та визначають умови протікання та інтенсивність хімічного перетворення, яке спричинило їх виникнення. В результаті, горіння з погляду своїх закономірностей переходить від якісно чисто хімічного процесу до процесу в основному якісно чисто фізичного, і цей перехід більшістю своїх характеристик відбувається різко та стрибком. Цю обставину завжди слід мати на увазі при аналізі явищ горіння [15].

Для виникнення та перебігу процесу горіння необхідні наступні умови:

- наявність у певний момент часу в даній точці простору горючої речовини, окислювача та джерела запалення;
- горюча речовина та окислювач повинні бути у певному кількісному співвідношенні;
- джерело запалення повинно мати достатню енергію.

У більшості випадків горіння відбувається внаслідок екзотермічного окислення речовини, здатної до горіння, якимись окислювачами (киснем, хлором, оксидом азоту і т. д.). При цьому беруть участь два основних компонента – горюча речовина та окислювач. За цим механізмом відбувається

горіння газів, нафти, бензину, керосину, деревини, торфу та інших горючих речовин – вуглеводнів, які містять у хімічній формулі вуглець і водень. Проте процес горіння може відбуватися не лише при реакціях з'єднання горючої речовини з окислювачем (Рисунок 2.6), але і при інших реакціях, пов'язаних із виділенням значної кількості тепла та швидким хімічним перетворенням. До них відносяться розпад вибухових речовин та озону, взаємодія оксидів натрію та барію з діоксидом вуглецю, розпад ацетилену тощо [42].



Рисунок 2.6 – Деякі з можливих причин горіння

Найбільш загальною властивістю горіння є здатність виникаючого вогнища переміщуватися по всій горючій суміші шляхом передачі тепла або дифузійного переносу нагрітих частинок з зони горіння до свіжої суміші. У першому випадку механізм поширення вогню називається тепловим, у другому – дифузійним. Зазвичай горіння відбувається за комбінованим механізмом, який включає як обмін теплом, так і дифузію горючих компонентів та продуктів горіння.

Для процесів горіння характерна наявність критичних умов виникнення та поширення вогню – певних фіксованих значень тиску, температури, розмірів системи, складу горючої суміші тощо, при досягненні яких відбувається запалення суміші, поширення вогню або його загасання. У всіх випадках для процесу горіння характерні три етапи – виникнення, поширення і загасання вогню.

### 2.2.1 Горіння газів та парів

Якщо горючі гази та пари не змішані з повітрям і знаходяться в закритому балоні або апараті, то вони не можуть горіти, оскільки відсутній окислювач – кисень. У технологічних процесах, пов'язаних з виробництвом або використанням горючих газів і рідин, може відбуватися утворення сумішей газів і парів рідини з повітрям. Такі суміші можуть бути небезпечними стосовно виникнення пожежі та вибуху.

На Рисунку 2.7 приведено зовнішній вигляд полум'я при спалювання природного газу (а) і парів спирту (б).

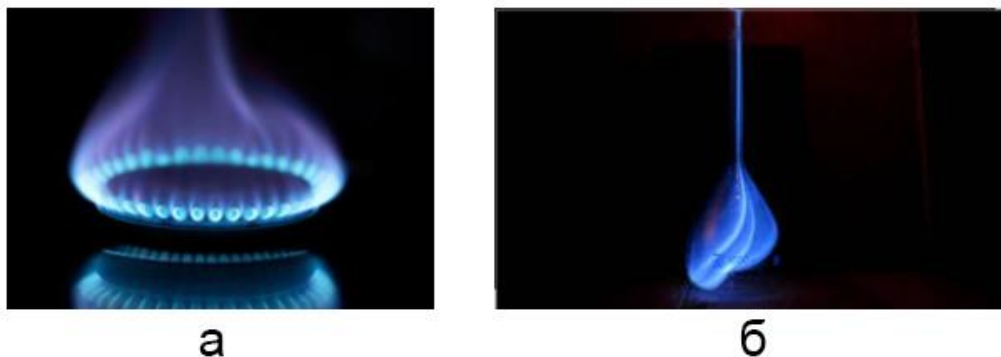


Рисунок 2.7 – Згоряння природного газу (а) і парів спирту в колбі (б)

Особливістю горіння гомогенних систем є наявність критичних умов, тобто певних параметрів, характерних для конкретної горючої суміші, за межами яких реакція протікає стаціонарно, без само прискорення, а в їх межах вона само прискорюється. До таких параметрів відносять склад суміші, тиск, початкову температуру, наявність домішок, геометрію посудини та матеріал її стінок та деякі інші. Перехід від повільного стану до швидкого має різкий характер. Досить змінити навіть трохи розмір посудини, температуру або концентрацію горючого, як течія реакції радикально змінюється. У деяких випадках при постійному впливі джерела запалення (наприклад, полум'я) запалення не відбувається. Взаємодія горючого та окислювача відбувається, але лише в зоні полум'я, і воно не поширюється само по собі. Поступово увесь склад реагує. Час повної витрати горючого залежить від джерела запалення – його потужності, температури, площі дії. Якщо параметри суміші знаходяться в області запалення, то достатньо короткочасного впливу джерела запалення, щоб стався вибух або швидке спалювання суміші.

Розглянемо вплив концентрації на здатність суміші до samozапалення. Відомо, що для запалювання газової суміші концентрація горючого повинна знаходитися в певних межах – між нижньою і верхньою межами запалюваності. Ці межі залежать від горючого, окислювача, пристрою, в якому досліджується процес (геометрії посудини, матеріалу її стінок), наявності сторонніх домішок у газовій суміші.

Пояснення наявності меж запалюваності лежить в області хімічної кінетики. Як відомо, швидкість хімічних реакцій пропорційна добутку концентрації реагуючих речовин. У даному випадку це пальне і окислювач. Нижня межа характеризується низькою концентрацією пального, тому швидкість мала і процес згасає, відбувається без само прискорення.

Верхня межа пов'язана з малою концентрацією окислювача, з його недостатністю для розвитку процесу горіння. Найбільш оптимальним для процесу горіння є стехіометричне співвідношення горючого і окислювача, тобто відповідне коефіцієнтам у рівнянні реакції між ними.

Через наявність нижньої межі запалюваності повне спалювання пального майже ніколи не відбувається. Особливо це проявляється в пристроях, де існує короткий час перебування пального в факелах (наприклад, в двигунах внутрішнього згоряння). У них завжди відбувається викид в атмосферу незреагованого пального (газу, бензину, дизельного пального і т. д.). На великих ТЕЦ горіння відбувається в довгих факелах (Рисунок 2.8), і частка незгорівшого пального суттєво менше.

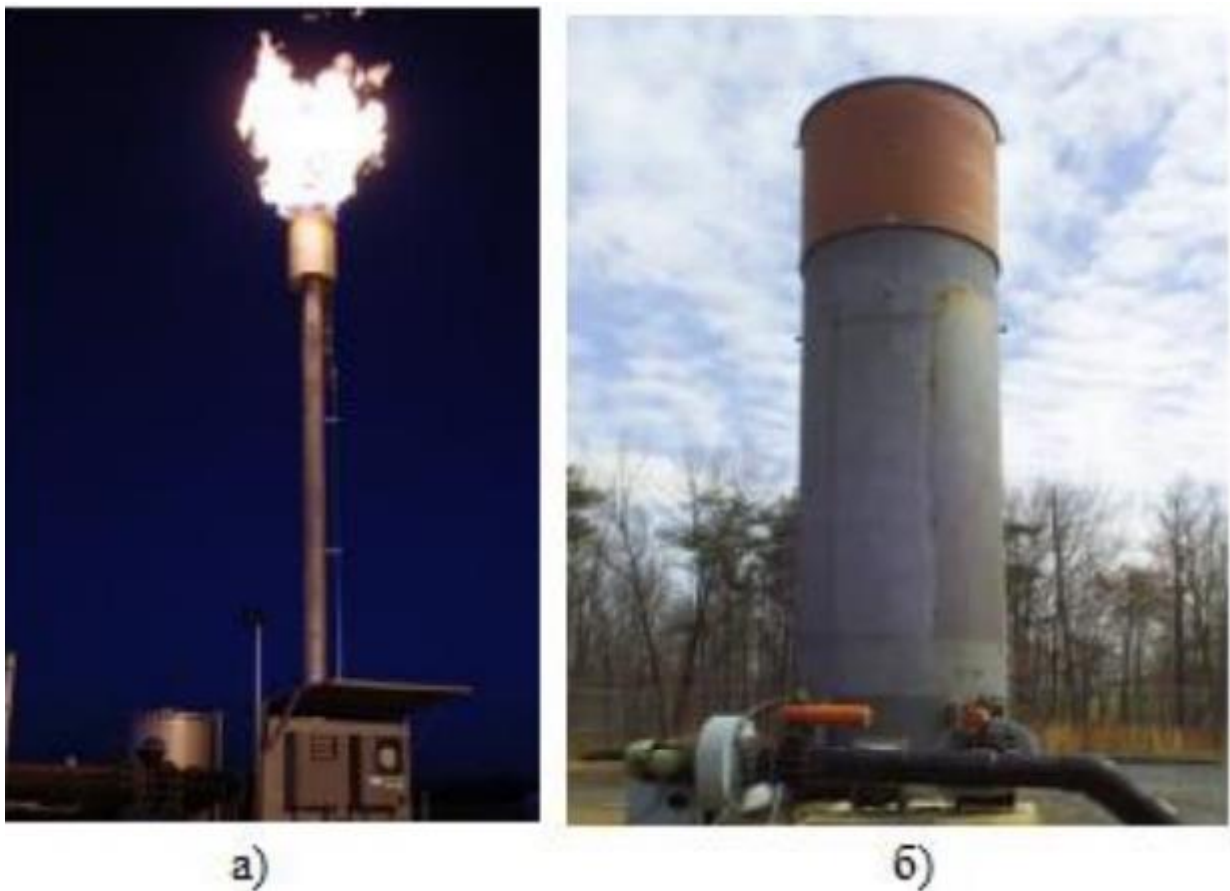


Рисунок 2.8 – Відкриті (а) і закриті (б) факели

Під час горіння газів та парів горючих рідин у повітрі виокремлюють два режими горіння – дифузійний та кінетичний. Процес горіння, швидкість якого залежить від швидкості дифузії парів або газів та повітря, називається дифузійним. Такий режим спостерігається, коли пари або газ викидаються з балона в атмосферу і запалюються в місці виходу. У дифузійному режимі

горять пари керосину, які виходять з горілки примуса, парафінова свічка, газ, що виходить з горілки газової печі і таке інше. При кінетичному режимі горіння інтенсивність горіння визначається концентрацією пального (складом суміші), родом пального і окислювача, температурою і тиском суміші, тобто залежить від того, чим визначається швидкість хімічних реакцій, – залежить тільки від кінетики самих хімічних реакцій.

Якщо газ перемішаний з повітрям, то основне значення має не швидкість дифузії компонентів горючої суміші, а швидкість хімічних реакцій. При цьому швидкість реакції збільшується зі збільшенням вмісту повітря в суміші і може досягати великих значень. Так, для суміші водень-повітря швидкість горіння може досягати 5-6 м/с. Згорання суміші з такою швидкістю супроводжується великим виділенням тепла за одиницю часу і нагріванням продуктів згорання до високої температури. Якщо горіння відбувається в закритому приміщенні або апараті, то розширення газів при нагріванні призводить до різкого підвищення тиску, тобто до вибуху. Тому суміші горючих парів та газів з повітрям відносяться до вибухонебезпечних сумішей.

### 2.2.2 Горіння рідин

Горіння рідин має свої специфічні особливості. Цей процес дуже важливий, оскільки відбувається всюди, де використовується рідке або тверде пальне. Існує два способи горіння гетерогенних систем – спалах і запалювання. Проходження процесу залежить від співвідношення швидкості випаровування пального ( $W_{\text{вип}}$ ) і швидкості його горіння ( $W_{\text{гор}}$ ). Якщо виконується умова  $W_{\text{вип}} < W_{\text{гор}}$ , то процес відбувається як спалах. Спалах – це процес нестійкого горіння, що швидко припиняється.



З наявністю постійно діючого джерела запалення (наприклад, нагрітого тіла), періодично відбуваються запалення випарованої частини пального і припинення процесу. Спалах відновлюється, коли концентрація пального в газовій фазі знову досягає нижньої межі запалення. Лімітуючою стадією цього процесу є випаровування рідини. Процес відбувається в області дифузії. Зазвичай спалах супроводжує горіння рідин при низьких температурах, при яких швидкість випаровування мала.

Зі збільшенням температури частота спалахів зростає, і при досягненні певної температури (температури запалення) процес горіння стає постійним. Такий процес горіння рідких гетерогенних систем називається запаленням. Для цього необхідно виконання умови  $W_{\text{вип}} \geq W_{\text{гор}}$ .

Для горіння рідин також існують обмеження температури займання (Рисунок 2.9), але вони виражені температурою. Температура рідини, при якій над поверхнею створюється концентрація насиченої пари, рівна нижньому температурному обмеженню займання, називається нижньою температурною межею займання. Температура рідини, при якій над поверхнею створюється концентрація насиченої пари, рівна верхньому температурному обмеженню займання, називається верхньою температурною межею займання.

бензини .....	250–530
Ацетон .....	460–670
Бензол .....	560–660
Дизельне пальне.....	300–330
Мастила .....	330–380
Метиловий спирт ... ..	380–490
Пальне для турбогвинтових та турбореактивних .....	210–250

Рисунок 2.9 – Обмеження температур займань деяких рідин

Температурні межі встановлюються в умовах, при яких досягається рівновага рідина-пар, тому вони є термодинамічними параметрами.

З температурою кипіння пов'язана така характеристика рідин, як швидкість вигорання. Під цим терміном розуміється лінійна швидкість зменшення висоти шару рідини під час її горіння з вільної поверхні протягом одиниці часу. Швидкість вигорання залежить від температури, діаметра резервуара, рівня рідини в резервуарі, швидкості вітру і так далі.

Самозаймання – це явище швидкого зростання швидкості горіння без контакту з джерелом запалювання. Умовами самозаймання можуть бути гостре підвищення температури або тиску, а також введення суміші в нагріту посудину. Необхідно, щоб при цьому суміш знаходилася в концентраційних межах займання і була досягнута температура самозаймання, яка є характерною для даної горючої суміші і конструкції конкретного пристрою.

Самозаймання характерно і для рідинних гетерогенних сумішей. Відмінність між гомогенним і гетерогенним самозайманням полягає в наступному. Для гомогенного самозаймання це чисто хімічний процес, а для гетерогенного він складається з двох етапів – фізичного і хімічного. Наприклад, в дизельному двигуні послідовно проходять наступні процеси – вприскування, розпилювання пального на туман, випарювання крапель, дифузія (змішування парів пального з повітрям), самозаймання, горіння. Останні два етапи – хімічні, інші – фізичні. Фізичні етапи є найповільнішими і обмежуючими при роботі дизельних двигунів. Відзначимо, що відмінністю самозаймання є те, що воно призводить до загорання всієї суміші одночасно. Для того, щоб відбулося самозаймання, необхідно досягти певної температури – температури самозаймання. Значення температури самозаймання залежать від методики і можуть різнитися для різних методик, іноді значно. На це впливають також загальний тиск, наявність сторонніх домішок в суміші, конструктивні особливості установки для згорання і інше.

### 2.2.3 Горіння твердих речовин

Горіння твердих горючих матеріалів (ТГМ), таких як деревина (Рисунок 2.10 а), целюлоза, вовняні вироби, полімерні матеріали та метали (Рисунок 2.10 б), має свої власні особливості і механізми. Більшість ТГМ горять у полум'ї (гомогенне горіння).



Рисунок 2.10 – Горіння деревини (а) і горіння заліза в кисні (б)

Утворення газоподібних горючих речовин пов'язане з розкладом ТГМ при нагріванні – піролізом. Під час піролізу ТГМ відбувається розрив хімічних зв'язків в молекулах пального та утворення проміжних речовин з відносно низькою молекулярною масою. Полум'яне горіння можливе в тому випадку, якщо концентрація горючих продуктів піролізу знаходиться в області концентраційної межі розповсюдження. Постійний потік горючих парів та газів до зони горіння підтримується інтенсивним тепловим потоком від полум'я до поверхні ТГМ. Тут важливо просторове розташування поверхні ТГМ відносно полум'я, оскільки передача тепла може відбуватися не тільки за допомогою радіаційного потоку, але і конвекцією та теплопровідністю.

Найпоширенішим ТГМ є деревина, горіння якої супроводжується утворенням карбонізованого залишку.

Після виходу летючих продуктів піролізу та згасання полум'я нагрітий карбонізований залишок поверхні деревини безпосередньо контактує з повітрям, і починається завершальний етап горіння – "тління" або безполум'яне горіння – поверхневе окиснення твердого матеріалу (гетерогенне горіння). Варто зазначити, що тління, що самопідтримується, характерне не тільки для деревини, але і для паперу, целюлозних тканин, стружки, латексної гуми тощо. Максимальна температура тління целюлозних матеріалів становить 600-750 °С. Швидкість поширення тліючого горіння (лінійна швидкість) складає 0,01 мм/с. Характеристичним параметром горіння ТГМ є масова швидкість вигорання. Характер горіння металів в багатьох відношеннях визначається значеннями температур плавлення і кипіння самого металу та утвореного окису, який утворює плівку на поверхні матеріалу, що горить. Горіння металів, як правило, спостерігається у випадку, якщо вони перебувають у вигляді стружки, порошку, аерозолів.

Зона горіння визначається, переважно, розподілом горючих речовин в просторі та формуючими її конвективними газовими потоками. Зона теплового впливу на землі визначається в першу чергу радіаційним тепловим потоком, оскільки конвективні теплові потоки направляються вгору.

#### **2.2.4 Термодинаміка горіння**

Термодинамічні процеси горіння детально розглянуті у роботі [43]. У цьому розділі ми наведемо лише деякі найважливіші, на наш погляд, термодинамічні величини та їх характеристику. Вказано, що перший закон термодинаміки впливає з експериментів Джоуля [44], який показав, що механічна робота, виконана над термічно ізольованою системою (водою), підвищує температуру розглянутої системи. Підвищення температури,

наприклад, при перемішуванні компонентів, терті «метал-метал», стисканні газів, є наслідком механічної роботи над системою. Таким чином, Джоуль показав, що одиниця переданої теплоти пропорційна одиниці виконаної роботи, причому незалежно від способу виконання роботи.

Загальне формулювання першого закону термодинаміки було дано в роботах Гельмгольца (Рисунок 2.11) [45]. Цей закон стверджує, що в ізольованій системі (де нема переносу маси та енергії) сума енергій всіх видів є постійною. Зміна внутрішньої енергії системи дорівнює сумі переданої їй теплової енергії та роботи, виконаної над системою.



Рисунок 2.11 – Герман Гельмгольц

Перший закон термодинаміки в загальній формі може бути записаний наступним чином:

$$dE = \delta Q \pm \delta W, \quad (2.1)$$

де  $dE$  – зміна внутрішньої енергії системи, яка поглинає або витрачає кількість тепла  $\delta Q$  та кількість роботи  $\delta W$ ; символи  $d$ ,  $\delta$  позначають нескінченно малі

зміни величин, знак «+» означає, що енергія передається в систему, а знак «-» означає, що енергія відводиться з системи.

Величина  $dE$  залежить лише від початкового та кінцевого стану системи; величини  $\delta Q$  та  $\delta W$  залежать від шляху, який проходить система від початкового до кінцевого стану.

Термодинамічна функція стану, яка характеризує хімічні процеси при постійному тиску ( $p = \text{const}$ ), є ентальпією. Ентальпія визначається з рівняння

$$H = E + pV, \quad (2.2)$$

де  $p$  – тиск,  $V$  – об'єм.

Оскільки  $E$ ,  $p$  і  $V$  є функціями лише стану, то і  $H$  також є функцією стану.

Символом  $H$  (якщо немає іншого зауваження) позначена ентальпія невказаної кількості речовини в розглянутій системі. Якщо розглядати молярні кількості речовини, то ентальпія записується  $H_i$ . У випадку розглянутих кількостей речовини, віднесених до 1 кг, ентальпія позначається з чортою над буквою. Так,  $H_i$  представляє собою ентальпію 1 моля чистої речовини (сполуки), а  $\overline{H}_i$  – ентальпію 1 кг сполуки.

Для ідеальних газів рівняння стану газу має наступний вигляд:

$$pV = NRT. \quad (2.3)$$

При чому ентальпія є функцією тільки температури, тому вираз має наступний вигляд:

$$\left(\frac{\partial H}{\partial p}\right)_T = \left(\frac{\partial H}{\partial V}\right)_T = 0. \quad (2.4)$$

Це вираз справедливий для відносно низьких тисків (1 атм).

Розглянемо певну масу горючої газової суміші як термодинамічну систему, до якої додається або з якої вилучається тепло. При цьому зміна тепла протікає таким чином, що система залишається ізотермічною.

Рівняння (1.1) та диференційну форму рівняння (1.2) можна просумувати наступним чином:

$$dH = \delta Q - \delta W + pdV + Vdp. \quad (2.5)$$

Оскільки нас цікавлять горючі системи, які виконують лише роботу розширення газів проти оточуючого середовища, то може бути використане рівняння:

$$\delta W = pdV. \quad (2.6)$$

Якщо зробити припущення про постійність тиску, то рівняння (1.3)

$$(dH)_p = (\delta Q)_p, \quad (2.7)$$

або для кінцевих змін

$$(\Delta H)_p = Q_p. \quad (2.8)$$

Отже, для хімічних перетворень при постійному тиску, коли виконується лише механічна робота проти оточуючого середовища, зміна ентальпії системи дорівнює теплоті, виділеній або поглинутій в результаті реакції. Ця зміна ентальпії  $\Delta H_p$  називається теплотою реакції при постійному тиску.

### 2.3 Аналіз сучасних досліджень і публікацій

В Україні використання біопалива на основі рослинної біомаси стає все більш перспективним із року в рік, як засіб заміщення викопних палив [46]. Це впроваджується на практиці для захисту навколишнього середовища, скорочуючи викиди парникових газів та пилу в атмосферу. З точки зору зручності і вартості опалення паливні пелети конкурують лише з природним газом, якщо будинок приєднаний до центральної газової мережі. У випадку відсутності центрального газопостачання підключення до газової мережі пов'язане з більшими витратами, порівняно зі встановленням твердопаливного пелетного котла.

На українському ринку пропонуються два основних типи пелет: "білі" пелети, виготовлені з деревини твердих порід, і "сірі" пелети, виготовлені з деревини хвойних порід, рапсу тощо, що пресуються у вигляді гранул. Оскільки пелетні котли розраховані на певний тип пелетів, виникають питання щодо збереження характеристик роботи котла при переході на інші види палива за їх складом та якістю. Комп'ютерне моделювання за допомогою визнаних програмних комплексів є одним з можливих інженерних шляхів для визначення можливостей заміни палива та впливу на характеристики роботи енергетичного обладнання.

За результатами аналізу доступної літератури видно, що в Європейському Союзі пелети є основним джерелом теплової енергії при децентралізованому теплопостачанні. Пелети, або деревні гранули, представляють собою стиснуті гранули, виготовлені з відходів деревообробної та сільськогосподарської промисловості. Використання пелет у вигляді біопалива забезпечує 86% відновлюваної теплової енергії та охолодження в ЄС (58,6% від загального споживання відновлюваної енергії) [47].

У 2050 році загальне використання біопалива в Україні може сягнути 23,1 млн тон на рік. Приблизно 50% цієї кількості буде спрямовано на виробництво



тепла, що замінить природний газ (еквівалентно заміні 13,7 млрд м<sup>3</sup>/рік природного газу). Решта буде використана для заміщення вугільної та атомної енергії у виробництві електроенергії, а також нафтопродуктів у транспорті. На Рисунок 2.12 наведено потенціал використання біопалива в Україні.



Рисунок 2.12 – Потенціал біопалива в Україні

У період з 2020 по 2050 роки використання деревної біомаси в Україні залишиться на тому ж рівні, але збільшиться частка використання для виробництва енергії з соломи, стебел, лущиння соняшнику, сільськогосподарських відходів, енергетичних культур, рідкого біопалива та твердих відходів. Ця прогнозна інформація ґрунтується на розрахунках, які показують, що потенціал деревної біомаси та соняшникових сіножатів в Україні у 2020 році вже використано на понад 90% [48].

З врахуванням вищесказаного, важливим і актуальним завданням для досягнення енергетичної незалежності країни є розробка рекомендацій зі спалювання недеревної біомаси в домашніх котлах з низьким рівнем викидів. Це може бути досягнуто шляхом розробки нових або вдосконалення існуючих систем горіння за допомогою чисельних методів. Чисельні методи часто використовуються для вивчення різних підходів та заходів зменшення викидів

забруднюючих речовин від систем спалювання біомаси, особливо великих або промислових котлів [49]. Чисельне моделювання часто є цінним інструментом для аналізу теплопередачі та розподілу температури димових газів, як показано в [50].

Зазвичай при моделюванні процесів горіння твердих палив акцент робиться на дослідженні процесів камерного спалювання, особливо для потужних енергетичних котлів [51, 52]. Проте, в літературі існує обмежена кількість даних щодо моделювання горіння твердих палив, зокрема пелет, у невеликих опалювальних котлах.

Одним із важливих внесків в цю область є дослідження корейських авторів [53], де методи математичного моделювання та експериментальні методи використовувались для оцінки характеристик роботи пелетного котла, зокрема, кінетики спалювання паливних пелет. Проте, важливо відзначити, що ці результати були отримані лише для одного типу палива.

Також важливо враховувати, що є думка, буденна спалювання агропелет (Рисунок 2.13) не призводить до посилення парникового ефекту, проте деякі дослідження свідчать про збільшення викидів твердих частинок під час спалювання сертифікованих та несертифікованих деревних пелет. Викиди коливаються від 21,9 до 110 мг/м<sup>3</sup> при 10% O<sub>2</sub> в сухих димових газах [54]. Крім того, агропелети з високим вмістом золи та низькою температурою плавлення можуть становити проблему. Наприклад, гранули з пшеничної соломи, згадані в [55], виявилися непридатними для побутового застосування через високий вміст золи та низьку температуру плавлення золи, яка підтверджується також іншими дослідженнями [56] щодо використання гранул, що складаються з чистої пшеничної соломи.



Рисунок 2.13 – Агропелети

В сучасних системах опалення для приватних і комунальних будівель використовуються різноманітні агрегати, призначені для спалювання пелет. Серед них вживають як ретордні, так і сучасні факельні пальники. Також застосовується метод спалювання солом'яно-бітумних гранул у барботажному псевдозрідженому шарі. Дослідження, виконане в роботі [57], фокусувалося на аспектах, таких як вивільнення та сегрегація летких, подрібнення та вигорання вуглецю, викид частинок з шару гранульованого палива і постгоріння над цим шаром.

Автори [57] розробили одновимірну математичну модель для цієї роботи, де камеру згорання, в якій відбувався процес спалювання, умовно розділили на три зони: щільно укладений шар гранульованого палива, зона розбризкування і зона вільних потоків. Рівняння збереження імпульсу і маси були сформульовані для п'яти видів хімічних компонентів ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  і  $\text{CO}_2$ ) в цих трьох зонах. Згідно з оцінками моделі, приблизно 53% летючих речовин горять всередині щільно укладеного шару гранульованого палива, виділяючи 60% загального тепла. Частка тепла, яка виділяється в зоні розбризкування, становить близько 33%, тоді як решта (7%) припадає на зону вільних потоків. Хоча модель є спрощеною, вона задовільно описує продуктивність горіння.

Отже, з урахуванням значної кількості публікацій за останні роки, можна визначити значний інтерес суспільства до цієї тематики. Таким чином,

дослідження, спрямовані на оцінку роботи котла та забезпечення необхідних параметрів його функціонування при спалюванні агропелет, залишаються актуальними.

## 2.4. Різновиди палива для теплообмінних апаратів

Теплообмінні апарати (теплообмінники) (Рисунок 2.14) – це пристрої, призначені для передачі тепла між двома або більше середовищами. Вони використовуються для ефективного обміну тепла між різними речовинами з різних процесів чи систем, забезпечуючи оптимальний теплообмін для підтримання бажаних температурних режимів.

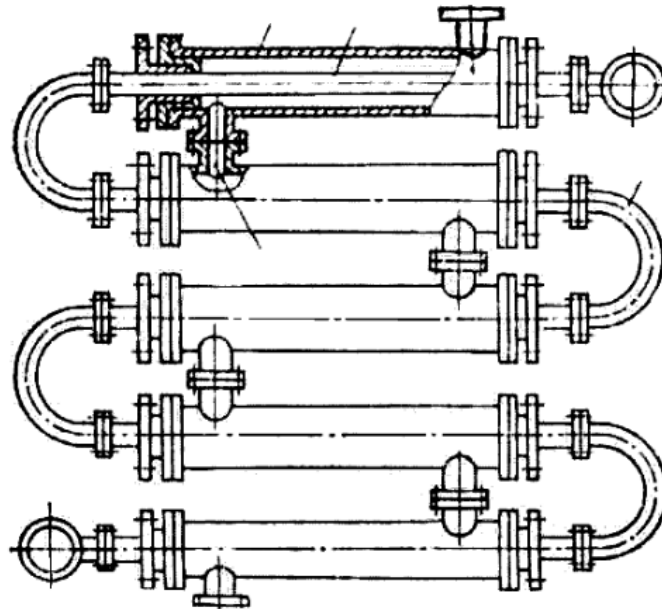


Рисунок 2.14 – Теплообмінні апарати (теплообмінники)

Такі апарати широко застосовуються у різних галузях технологій та промисловості, включаючи енергетику, хімічну промисловість, харчову промисловість, фармацевтику, нафтогазову промисловість та багато інших. Вони дозволяють ефективно переносити тепло від одного середовища до іншого, забезпечуючи оптимальні умови для процесів, що відбуваються в цих середовищах.

Типи теплообмінних апаратів можуть варіюватися від простих систем з обмінниками тепла до складних конструкцій, таких як реактори з обігрівом або

конденсатори для хімічних процесів. Вони можуть бути виготовлені з різних матеріалів залежно від призначення та умов експлуатації, таких як сталь, мідь, алюміній, титан і багато інших.

Такі пристрої є невід'ємною частиною багатьох технологічних процесів та систем, що дозволяють забезпечувати ефективний теплообмін та оптимальні умови для функціонування різноманітних систем та процесів.

Загалом, види палива для теплообмінних апаратів можна умовно розбити на чотири групи: електрика, газ, рідке та тверде паливо. Розглянемо кожен з груп.

#### 2.4.1 Пальне на основі електрики

Електрика, як вид енергії, може використовуватися як паливо для теплообмінних апаратів, особливо для електричних обігрівачів та електричних котлів (Рисунок 2.15). Використання електроенергії для нагріву рідин чи повітря у теплообмінних системах дозволяє отримувати швидкий, ефективний та точний контроль над процесом теплообміну.



Рисунок 2.15 – Електричні котли

Електричні теплообмінні системи мають декілька переваг. По-перше, вони є досить чистим та екологічно безпечним джерелом енергії, оскільки не викидають продукти згоряння, шкідливі гази або викиди в атмосферу. Це робить їх відмінним вибором для тих випадків, коли важлива екологічна безпека та дотримання стандартів чистого повітря.

По-друге, електричні системи теплообміну дозволяють забезпечувати точний контроль та регулювання теплових параметрів процесу. Це дозволяє швидко змінювати температуру залежно від потреб системи, що робить їх ефективними та гнучкими у використанні для різних умов та вимог.

Однак важливо враховувати деякі обмеження електричних систем теплообміну, такі як високі витрати на електроенергію порівняно з іншими джерелами енергії, такими як природний газ або нафта. Це може вплинути на економічну ефективність таких систем на великій відстані. Також важливо враховувати витрати на утримання та експлуатацію обладнання, а також вартість обслуговування.

В цілому, електрика як вид енергії для теплообмінних апаратів може бути ефективним вибором у випадках, коли важливий чистий та точний контроль над процесом теплообміну, але вимагає уваги до економічних обмежень та витрат на електроенергію.

#### **2.4.2 Пальне у вигляді газу**

Газ є одним із найширше використовуваних видів палива в теплообмінних системах завдяки його ефективності, доступності та багатьом іншим перевагам. Він є високоефективним джерелом палива, оскільки його засоби спалювання можуть бути легко контрольовані для забезпечення високої температури теплопередачі, що робить його ефективним для багатьох промислових і домашніх застосувань (Рисунок 2.16).



Рисунок 2.16 – Газовий котел для опалення домів VISSMANN Vitopend 100-W 24 кВт A1JB010

Порівняно з іншими видами палива, газ має менший вуглецевий відбиток, оскільки його засоби спалювання видають менше шкідливих речовин, таких як сажа і оксиди азоту, що сприяє поліпшенню якості повітря і зменшенню негативного впливу на довкілля. Крім того, газові мережі для постачання природного газу широко розповсюджені, особливо у багатьох міських районах, що робить його доступним і зручним для багатьох споживачів.

Однак використання газу в теплообмінних системах також має свої недоліки. Газ є легкозаймистою речовиною, тому використання його вимагає дотримання спеціальних правил безпеки та встановлення відповідних пристроїв безпеки для запобігання можливості вибухів. Залежно від регіону та доступності, витрати на природний газ можуть бути вищими порівняно з іншими джерелами палива, що може становити проблему для деяких споживачів. Крім того, використання газу в теплообмінних системах вимагає наявності відповідної газової інфраструктури, що може бути обмежувальним фактором для деяких регіонів або країн, де така інфраструктура може бути



недостатньо розвиненою. Незважаючи на ці недоліки, газ залишається важливим джерелом палива для багатьох промислових і побутових застосувань завдяки своїм перевагам у відношенні до ефективності та екологічних показників.

### 2.4.3 Рідке паливо

Рідке паливо є важливим енергетичним ресурсом, яке використовується в різних сферах людської діяльності. Розглянемо деякі його види детальніше:

1. Дизельне паливо (ДП). ДП (відоме також як солярка), є популярним видом палива, що використовується в дизельних двигунах. Воно є менш вибагливим до температури порівняно з бензином та має вищий коефіцієнт стиснення, що дозволяє отримувати більше енергії з горіння. Дизельне паливо використовується у великих транспортних засобах, таких як вантажівки та автобуси, а також у різних промислових галузях. Також ДП використовується у багатьох теплообмінних системах для нагріву середовища. В контексті теплообмінників, ДП може бути використане для забезпечення тепла в промислових або комерційних приміщеннях, а також для виробництва пари або гарячої води для потреб обігріву та гарячого водопостачання.

ДП відзначається високою енергетичною щільністю, що дозволяє отримати значний обсяг тепла з малої кількості палива, забезпечуючи ефективні теплові процеси у теплообмінних системах. Крім того, ДП легко зберігається у відповідних ємностях і транспортується до місця його використання, що робить його зручним для застосування у різних умовах. Висока температура горіння ДП сприяє швидкому нагріванню теплоносія у теплообмінниках, забезпечуючи швидку і ефективну роботу системи.

Проте, горіння ДП може супроводжуватися викидами шкідливих речовин, таких як оксиди азоту ( $\text{NO}_x$ ) та частки діоксиду вуглецю ( $\text{CO}_2$ ), що можуть негативно впливати на довкілля та здоров'я. Відходи від спалення ДП

можуть містити частки діоксиду сірки ( $\text{SO}_2$ ), що спричиняє забруднення повітря та може мати негативний вплив на здоров'я людей та навколишнє середовище. Крім того, використання ДП підлягає коливанням цін на нафту та може залежати від геополітичної ситуації на світовому ринку нафти.

2. Мазут. Мазут є важливим видом палива для теплообмінних систем, особливо у промислових областях і системах опалення, де він використовується для нагрівання приміщень та виробничих процесів. У теплообмінниках мазут може використовуватися для нагрівання рідини або газу, які подальше використовуються для опалення або виробничих потреб. Нижче наведено кілька плюсів і мінусів використання мазуту в теплообмінних системах.

Мазут зазвичай має низьку вартість, особливо для промислових підприємств, де великі обсяги палива можуть бути необхідними для виробничих потреб. Його стабільна температура протягом тривалого періоду робить його популярним у системах опалення та теплообмінних системах, які потребують постійного нагрівання. Крім того, мазут доступний у різних класах і типах, що дає змогу вибрати оптимальний тип для конкретних виробничих або опалювальних потреб.

Однак, так само, як і у випадку ДП, горіння мазуту може супроводжуватися викидами шкідливих речовин, таких як оксиди азоту ( $\text{NO}_x$ ) та сірки ( $\text{SO}_2$ ). Використання мазуту може також призвести до забруднення димових газів і сажі, що вимагає ретельного обслуговування теплообмінників та систем вентиляції, щоб уникнути негативного впливу на довкілля. Висока в'язкість мазуту при низьких температурах може вимагати спеціальних умов зберігання та обробки для забезпечення ефективного використання у теплообмінних системах.

3. Біопаливо. Біопаливо (Рисунок 2.17) є важливим альтернативним джерелом енергії, яке набуває все більшої популярності в теплообмінних системах.



Рисунок 2.17 – Біопаливо BioFuel для каміна

Воно виготовляється з органічних матеріалів, таких як рослинні рештки, біомаса, відходи їжі та інші біорозпадаючі матеріали. Це може бути біодизель, етанол або біогаз, які використовуються у транспорті, теплоенергетиці та інших сферах. Нижче наведено кілька плюсів і мінусів використання біопалива в теплообмінних системах.

Екологічність є одним з найвагоміших плюсів біопалива, оскільки воно зазвичай має менший вуглецевий відбиток порівняно з традиційними видами палива. Відновлюваність є ще одним важливим фактором, оскільки біопаливо виробляється з органічних матеріалів, що робить його відновлюваним джерелом енергії, яке може допомогти зменшити залежність від нестійких джерел енергії. Зменшення рівня викидів також є вагомим плюсом, оскільки використання біопалива може сприяти зменшенню викидів шкідливих речовин у порівнянні з традиційними видами палива, що може сприяти поліпшенню якості повітря та зниженню негативного впливу на довкілля.

Як мінуси можна зазначити, що біопаливо може конкурувати з вирощуванням харчових культур, що може вплинути на ціни на харчові продукти та доступність їжі для деяких громад. Також виробництво біопалива може вимагати значних енергетичних витрат, особливо під час процесу

вирощування рослин і переробки їх на паливо, що може скорочувати його загальну екологічну ефективність. Додаткові зусилля можуть знадобитися для забезпечення ефективного використання біопалива через спеціальну обробку та зберігання, оскільки воно може бути більш вразливим до забруднення та розкладу порівняно з традиційними видами палива.

#### 2.4.4 Тверде паливо

Тверде паливо (Рисунок 2.18) грає важливу роль у контексті теплообмінників, забезпечуючи ефективне та надійне джерело енергії для опалення та виробничих процесів. Твердопаливні теплообмінники використовуються для ефективного передачі тепла від твердого палива до робочого середовища, забезпечуючи ефективну теплову енергію для різноманітних промислових та побутових застосувань. Розглянемо деякі з видів твердого палива.



Рисунок 2.18 – Види твердого палива

1. Дрова є одним з найпоширеніших видів твердого палива, що використовується для опалення та теплообмінних систем. Вони є

відновлюваним джерелом енергії і мають декілька переваг у порівнянні з іншими джерелами тепла. Переваги включають доступність та широке поширення, особливо в сільських районах, де деревина є легко доступним ресурсом. Використання дров у теплообмінних системах дозволяє забезпечити ефективне опалення для побутових будинків, промислових підприємств та інших приміщень.

Однак, у деяких випадках використання дров може мати свої недоліки. Наприклад, вони можуть вимагати значних зусиль для збору та обробки, що може бути проблематичним для деяких користувачів. Крім того, зберігання дров вимагає відповідного простору та умов, щоб уникнути псування. Деякі види дров можуть також мати обмежений час згоряння, що потребує постійного додавання нових дров до теплообмінника.

2. Вугілля також є одним з найбільш поширених видів твердого палива, що використовується для теплообмінних систем. Його використання має кілька переваг, зокрема високу енергетичну цінність, що дозволяє забезпечити ефективне опалення при великих масштабах. Вугілля є досить доступним ресурсом у багатьох регіонах світу, що робить його привабливим для використання у промисловості та побутових умовах. Також вугілля має стабільний та довгий час згоряння, що дозволяє забезпечити стале теплопостачання протягом тривалого часу.

Однак, вугілля також має свої недоліки. Воно може мати шкідливий вплив на навколишнє середовище, викидати забруднення та шкідливі гази, такі як вуглекислий газ та сірковуглець. Крім того, видобуток та спалювання вугілля можуть бути енергоємними процесами, що призводять до додаткових викидів парникових газів та забруднення довкілля. Вугілля також потребує відповідних систем очищення та фільтрації для зменшення його негативного впливу на довкілля.

3. Торф – це природне торф'яне паливо, яке утворюється в результаті процесу розкладання рослинного матеріалу в умовах високої вологості та нестачі кисню. Він використовується як джерело енергії та тепла в багатьох

країнах, особливо в регіонах, де він є основним природним ресурсом. Торф має високу енергетичну цінність, що дозволяє ефективно використовувати його для опалення та виробництва енергії. Він є доступним та дешевим джерелом палива у багатьох регіонах, що робить його популярним серед виробників енергії.

До недоліків торфу можна віднести те, що його видобуток може мати негативний вплив на навколишнє середовище, включаючи знищення природних місць існування рідкісних видів рослин та тварин. Він також може мати високий вміст вологи, що робить його менш ефективним у порівнянні з іншими видами твердого палива. Крім того, його використання може спричиняти викиди парникових газів, що може мати негативний вплив на навколишнє середовище.

4. Топливні гранули (пелети) є компактними циліндричними гранулами, виготовленими зі стисненого натурального біоматеріалу, такого як дерево, солома або солодовий жом. Вони є ефективним джерелом тепла та енергії, оскільки мають високу енергетичну щільність та низький вміст вологи. Їх зручно транспортувати та зберігати, оскільки вони займають мало місця і можуть бути легко використані в побуті та промисловості для опалення та генерації енергії.

Пелети також вважаються біорозкладними та екологічно чистими, оскільки вони виготовляються з відновлюваних природних матеріалів. Вони мають низький вміст золи та викидів парникових газів, що робить їх більш екологічно безпечними порівняно з іншими видами твердого палива. Однак виробництво пелет може потребувати значної кількості енергії, що може вплинути на їхню екологічну дієздатність. У наступному розділі ми докладніше розглянемо процес виробництва пелет, їх використання та вплив на навколишнє середовище.

Використання твердого палива у теплообмінних системах дозволяє забезпечити ефективну теплову енергію для різноманітних застосувань, від опалення до виробничих процесів, забезпечуючи стабільне та ефективне джерело енергії для різних галузей промисловості та побуту.

## 2.5. Використання пелет в якості альтернативного палива

Останнім часом у сфері альтернативних видів палива широко використовуються відходи деревообробної галузі промисловості та сільського господарства, які спресовуються у формі гранул – пелет. На українському ринку доступні "білі" пелети (Рисунок 2.19, а), виготовлені з деревини твердих сортів, а також "сірі" пелети (Рисунок 2.19, б), що створюються з деревини хвойних порід, рапсу, пташиного посліду та соломи, і пресуються в гранули, щоб їх можна було автоматично подавати до пальника. Ці гранули відрізняються за хімічним складом, тепловою ефективністю та вартістю. Виникає питання – якими пелетами слід користуватися для обігріву побутових будинків?



Рисунок 2.19 – «Білі» (а) і «сірі» (б) пелети

На сьогоднішній день існує стандарт ENplus [58], який регулює фізико-хімічні властивості пелет і встановлює найвищі вимоги до якості дерев'яних пелет, а також регулює область їх використання (побутовий сектор, котельні і теплові станції). Для пелет, які призначені для використання у побуті, де

відсутнє високотехнологічне обладнання для очищення викидів, застосовуються найжорсткіші вимоги.

Згідно стандарту ENplus-A1, який застосовується для пелет побутового призначення, встановлені вимоги до зольності, які становлять 0,5% для пелет, виготовлених з хвойних порід дерев, і 0,7% для пелет з листяних дерев. Всі вищезазначені види пелет відповідають цим вимогам.

Виробники котельного обладнання мають змогу контролювати кількість забруднюючих речовин тільки в відпрацьованих газах. Однак визначити генерацію забруднюючих речовин в самому пальнику, топковій камері та конвективній частині котла можливо лише за допомогою чисельного моделювання.

У Європі тверде біопаливо, здебільшого на основі деревної біомаси, поступово витісняє традиційні види викопного палива на ринку тепла. Ця тенденція сприяє реалізації заходів для захисту навколишнього середовища шляхом зменшення викидів парникових газів і пилу в атмосферу [59]. З точки зору комфорту та вартості опалення, конкуренцію з пелетами складає лише природний газ, особливо якщо будинок підключений до центрального газопостачання. Опалення газом може бути конкурентоспроможним, але витрати на підключення будинку до газової мережі та розробку плану значно вищі, ніж встановлення твердопаливного пелетного котла [60].

На сучасному етапі розвитку енергетики пелети вважаються провідним джерелом теплової енергії в Європі. Пелети, або деревні гранули, є спресованими гранулами, які виготовляються з відходів деревини та сільськогосподарського виробництва. На сьогодні пелети є особливо популярними за межами Європи, зокрема у Данії, Швеції та Австрії, які є світовими лідерами у виробництві обладнання для спалювання пелет. Вони відзначаються високою екологічністю, мають таку ж теплотворну здатність, як і вугілля, та мають привабливу ціну як для промислового використання, так і для задоволення побутових потреб [60].



Обсяги споживання пелет для приватних, муніципальних та промислових об'єктів постійно зростають [59], оскільки пелети є екологічно чистим видом палива, яке, однак, не є основним джерелом енергії. Відповідно до досліджень [60], при спалюванні пелет у атмосферу виділяється стільки ж вуглекислого газу, скільки утворюється під час природного розкладання деревини. Пелети мають стабільно високу якість, забезпечують безпеку та екологічність, а також постійну насипну щільність, що сприяє відносно легкому транспортуванню цього сипкого продукту на великі відстані. Найголовніше, що пелети дозволяють автоматизувати управління процесом горіння. Це свідчить про те, що пелети є єдиним видом палива, який може стати справжньою альтернативою природному газу у побутовому секторі [59].

Розмір пелет, що вважається стандартним, може варіюватися у межах 6-8 мм у ширину і 5-70 мм у довжину. Ці параметри залежать від обладнання, яке використовується для спресовування сировини або відходів. Можна знайти й інші розміри, проте це не впливає на ефективність спалювання пелет.

Найвищу теплотворну здатність мають пелети, виготовлені з листяних порід дерев (Рисунок 2.20). Пелети з хвойних порід також присутні на ринку, але їх виробництво часто вимагає більш дорогої технології [58].



Рисунок 2.20 – Пелети з листяного дерева та з хвойного дерева

Одним з найбільших переваг пелет є їхня екологічна природа. Завдяки тому, що вони складаються з деревини, під час спалювання вони виділяють стільки ж вуглецю, скільки його ввібрало дерево при житті. Використання пелет зменшує необхідність вирубки лісів, тим самим роблячи їх поновлюваним джерелом енергії у порівнянні з вугіллям або нафтою.

Теплотворна здатність 1 кілограма пелет становить 5 кВт/год, що в середньому з урахуванням КПД теплогенераторів у півтора рази перевищує показник дров. Порівнюючи цей показник з ДП, можна узагальнено сказати, що один кілограм пелет виробляє стільки ж теплової енергії, скільки півлітра рідкого палива. Перевага пелет полягає в їхній безпечності, відсутності запаху та виділенні мінімальної кількості шкідливих речовин, що зазвичай виділяються під час спалювання вугілля.

## **2.6. Теплогідрравлічні характеристики водогрійного котла при спалюванні паливних пелет**

Водогрійні котли, що працюють на паливних пелетах, відіграють важливу роль у забезпеченні опалення та гарячого водопостачання в різних типах будівель. Для ефективного використання таких котлів важливо мати належне розуміння їх теплогідрравлічних характеристик. Нижче представлено деякі ключові аспекти теплогідрравлічної продуктивності водогрійних котлів, які працюють на паливних пелетах.

### **2.6.1 Ефективність передачі тепла**

Ефективність передачі тепла в теплогідрравлічних системах залежить від кількох ключових факторів, особливо при спалюванні паливних пелет. Під час розгляду теплогідрравлічних характеристик котла, який використовується для спалювання пелет, важливо враховувати кілька особливостей для забезпечення

ефективної передачі тепла. При використанні пелет важливо забезпечити використання високоякісних пелет, оскільки якість палива може впливати на його енергетичну щільність та здатність до ефективного спалювання. Оптимально розроблений теплообмінник (Рисунок 2.21) є важливим компонентом для забезпечення ефективної передачі тепла. Він повинен мати достатньо велику поверхню для контакту з теплоносієм, щоб максимально передавати тепло з газів спалювання до води. Чистота теплоносія та теплообмінника також впливає на ефективність передачі тепла. Належне технічне обслуговування системи та регулярне очищення теплообмінника допоможуть уникнути утворення відкладень і забезпечити ефективний обмін тепла. Важливо мати належне управління теплообмінним процесом, щоб уникнути перегріву або недостатнього нагріву води. Для цього можуть застосовуватися технології автоматизації та регулювання, які дозволяють підтримувати оптимальні умови для передачі тепла в системі.



Рисунок 2.21 – Теплообмінник для котлів на твердому паливі

### **2.6.2 Регулювання температури**

Регулювання температури грає важливу роль у забезпеченні оптимального функціонування теплогідрравлічних систем. Для досягнення ефективної роботи системи необхідно точно налаштувати температурний режим, щоб уникнути перегріву або недостатнього нагріву теплоносія. Забезпечення стабільності температури в системі допомагає уникнути виникнення збоїв та забезпечити надійну роботу котла.

Сучасні котли на пелетах часто оснащені терморегуляторами, які дозволяють контролювати температуру теплоносія в системі. Ці регулятори можуть бути програмованими для підтримання оптимального температурного режиму в залежності від потреб системи опалення. Додаткові датчики та системи моніторингу можуть використовуватися для автоматичного коригування температурного режиму залежно від зміни зовнішніх умов та потреб споживача.

Крім того, можуть застосовуватися технології зворотного зв'язку, які дозволяють котлу реагувати на зміни температури та забезпечувати стабільний рівень нагріву. Це може бути особливо важливо в умовах змінної зовнішньої температури, коли потреби в опаленні можуть змінюватися.

Загалом, належне регулювання температурного режиму є ключовим аспектом для забезпечення ефективної роботи котлів на пелетах, оскільки це допомагає економити енергію, підтримувати комфортні умови в приміщенні та забезпечувати довговічність обладнання.

### **2.6.3 Тиск теплоносія**

Під час спалювання пелет в котлах вода виступає як теплоносіє, що переносить тепло в системі опалення. Тиск теплоносія грає важливу роль у забезпеченні ефективності та стабільності роботи котла. Він може впливати на

ряд процесів, пов'язаних з циркуляцією та розподілом тепла, та вимагає уважного контролю та регулювання (Рисунок 2.22).



Рисунок 2.22 – Схема роботи обігріву за допомогою твердопаливного котла

Оптимальний тиск теплоносія є ключовим для забезпечення надійної та ефективної роботи котла. Занадто низький тиск може призвести до недостатнього нагріву системи та недостатньої постачання тепла, що може вплинути на комфорт в приміщенні. З іншого боку, надмірний тиск може призвести до збоїв у системі, перевантаження обладнання та можливого утворення пробоїв. Тому регулярний моніторинг тиску теплоносія є важливим аспектом забезпечення безпеки та ефективності роботи котла на пелетах.

При належному контролі тиску теплоносія можна забезпечити оптимальні умови для ефективного теплообміну, що дозволяє котлу ефективно нагрівати приміщення та забезпечувати комфортні умови для життя. Оптимальний тиск також допомагає зменшити знос та забезпечити довгий термін служби обладнання. Дотримання правильного рівня тиску теплоносія

може сприяти оптимізації енергоефективності та забезпечити стійку та ефективну роботу опалювальної системи.

#### 2.6.4 Оптимізація використання паливних пелет

Один з важливих аспектів оптимізації полягає у належному контролі подачі пелет у паливник (Рисунок 2.23), щоб забезпечити стабільне та ефективне горіння. Регулювання подачі пелет дозволяє досягти оптимального співвідношення між подачею палива та потребою в теплі, що забезпечує ефективне використання пелет та мінімізує втрати енергії.



Рисунок 2.23 – Пелетний паливник

Оптимізація використання паливних пелет у теплогідрравлічній системі котла включає в себе комплексний підхід, який охоплює належний контроль подачі пелет, моніторинг температури та тиску теплоносія, а також оптимізацію обігріву системи. Ці заходи сприяють ефективному використанню пелет та забезпечують оптимальну енергоефективність та комфорт у приміщенні.

## Висновки до другого розділу

1. Показано, що горіння є складним фізико-хімічним процесом, в результаті якого відбувається виділення тепла, світла і тепломасообмінні процеси з навколишнім середовищем. Процес горіння можна пояснити як реакції, що включають швидке хімічне перетворення, теплоперенос, дифузію і інші фізичні процеси.

2. Визначено, що явища горіння можна класифікувати за трьома основними групами: гомогенне горіння газоподібних горючих речовин, гетерогенне горіння твердих і рідких горючих речовин, та горіння вибухових речовин. Хімічні процеси горіння є складними і включають в себе перетворення речовини та зміну її якості, але фізичні явища також впливають на швидкість горіння.

3. Показано, що види палива, які використовуються у теплообмінних апаратах можна умовно розбити на чотири групи: електрика, газ, рідке та тверде паливо. Кожний вид має свої недоліки і переваги.

4. Обґрунтовано, що паливні пелети є провідним джерелом теплової енергії в Європі і перспективним видом палива в Україні, обсяги споживання якого мають постійне зростання.

## РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ГОРІННЯ В СУЧАСНИХ ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТАХ

### 3.1. Методика моделювання спалювання палива в пелетному котлі

Дослідження виконувалося за допомогою моделювання течії газу та її взаємодії з частинками вугілля. У процесі переміщення через газ, частинки вугілля виділяють газоподібні горючі речовини, які служать джерелом для реакції горіння. Для моделювання реакції можна використовувати або модель перенесення реагентів (species transport model), або модель горіння без попереднього змішування (non-premixed combustion model).

В рамках проведеного дослідження було виконано моделювання процесів, які відбуваються в топковій камері автоматичного котла на твердому паливі VIADRUS A0C з потужністю 20 кВт. У якості палива використовувалися дерев'яні пелети, що подавалися в факельний пальник із витратою 2 кг/с при швидкості нагнітаємого повітря 7,5 м/с і температурою 300 °С.

Хімічний склад палива (дерев'яних пелет, відходів деревообробної промисловості, так званих «білих» пелет) наведено в Таблицях 3.1 та 3.2.

Таблиця 3.1 – Склад сухої знезоленої маси

Proximate Analysis (Приблизний аналіз)	Wt, % (DAF)
Volatiles (Летючі)	70
Char (C(s)) (Зв'язаний вуглець)	16,6
Ash (Зола)	4,4
Moisture (Вологість)	9,0



Таблиця 3.2 – Хімічний склад сухої обеззоленої маси

Element	Wt, %	Mole Fraction
C	43,0	0,28284
H	6,0	0,4703
O	40,0	0,19752
N	7,0	0,03948
S	4,0	0,00986

Початкові дані, необхідні для виконання роботи, представлені в Таблиці 3.3.

Для моделювання роботи водогрійного котла була створена геометрична модель, на основі якої було побудовано скінчено-елементну модель з визначенням граничних умов та математичним описом розрахункового процесу, що було втілено засобами ANSYS-Fluent.

Таблиця 3.3 – Параметри, необхідні для виконання роботи

Параметр	Значення	Розмірність
Empirical secondary lower calorific value (Нижча теплота згоряння)	Визначається після перерахунку елементарного складу палива. Орієнтовно 17,8 МДж/кг	
Empirical secondary specific heat (Питома теплоємність продуктів згоряння)	1250	Дж/(кг·К)
Empirical secondary molecular weight (Молекулярна маса)	8,7	кг/кмоль
Coal as received HCV (Вища теплота згоряння)	16,79	МДж/кг
high temperature volatile yield (Вихід летючих при високих температурах)	1,0	–
fraction of N in char (DAF) (Вміст азоту у паливі)	0,5	–
Temperature (Температура займання палива)	+300	°С
Velocity magnitude (Середня швидкість повітря)	7,5...14	м/с
Total flow rate (Масова витрата палива)	2,6...4,3	кг/год

### 3.2. Опис моделі автоматичного пелетного котла

В якості модельного прототипу був обраний автоматичний пелетний котел VIADRUS A0C, для якого доступна інформація про конструктивні особливості та технічні характеристики [61].

Основною частиною котла є чавунний секційний котельний корпус, виготовлений із сірого чавуну згідно з EN 1561 сорт 150. Котельний корпус складається зі спресованих одна до одної секцій, з'єднаних кріпильними болтами. Ці секції формують камеру згоряння, зольник, водний простір та конвекційну частину. Вхід та вихід опалювальної води розташовані у задній частині котла. Задня секція має горловину димоходу та фланець опалювальної води у верхній частині та фланець живильної води з патрубком для впускного та випускного крана у нижній частині. Дверцята для чищення та зольника з факельним пальником прикріплені до передньої секції.

У котлі встановлено пальник для пелет від компанії PellasX [62] на дверцятах зольника. Бункер для пелет з листової сталі об'ємом 300 л розміщено справа (зліва) від котла і з'єднано з пальником за допомогою живильника палива та сполучного шлангу.

На Рисунку 3.1 та Рисунку 3.2 зображено компонування пелетного котла VIADRUS A0C, що приведені з метою формування у читача уявлення про конструкцію котла.

Рисунки 3.1 та 3.2 надають приклад компонування пелетного котла VIADRUS A0C для кращого уявлення читача про його конструкцію.

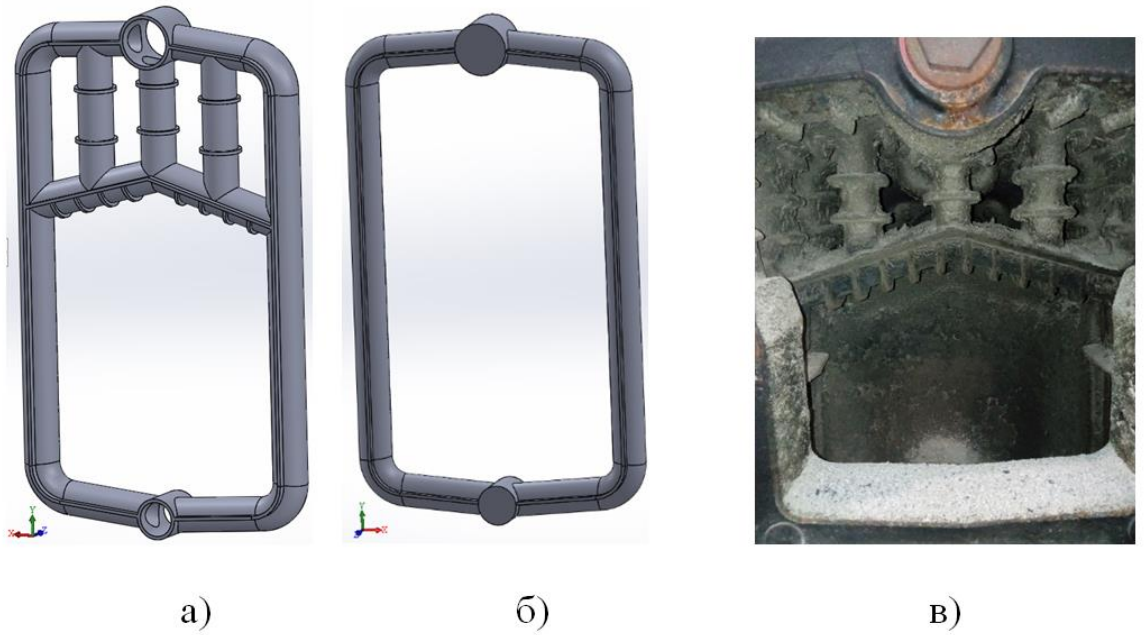


Рисунок 3.1 – Модель глибинної (а) і першої (б) секцій та фотографія топкової камери (в) діючого пелетого котла VIADRUS A0C

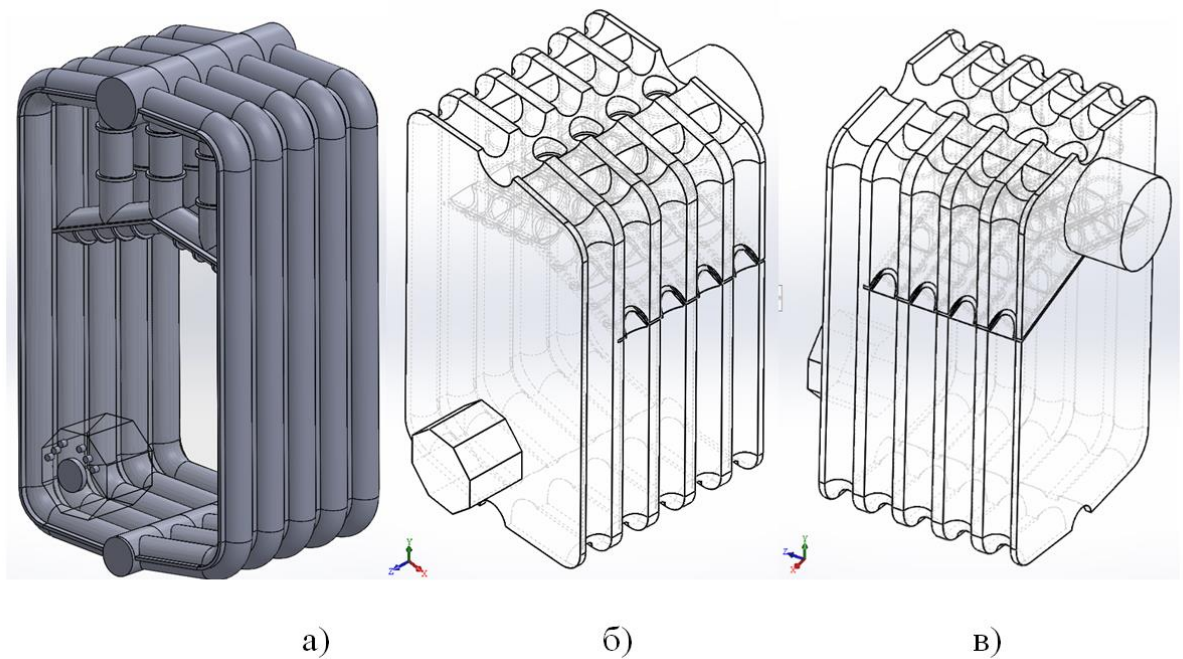


Рисунок 3.2 – Модель топкової камери пелетого котла VIADRUS A0C (а), фронтальний (б) і зворотній (в) види моделі топкової камери

### 3.3. Проведення моделювання в програмі ANSYS Fluent

Скінчено-елементна сітка у моделі враховує розвиток примежового шару на всіх твердих поверхнях котельного агрегату. Область за межами примежового шару була симульована за допомогою нерівномірної тетраедричної сітки (Рисунок 3.3а). Після конвертації моделі у Fluent, для оптимізації об'єму оперативної пам'яті комп'ютера під час розрахунків, тетраедричні скінчені елементи були об'єднані у шестигранні (Рисунок 3.3б).

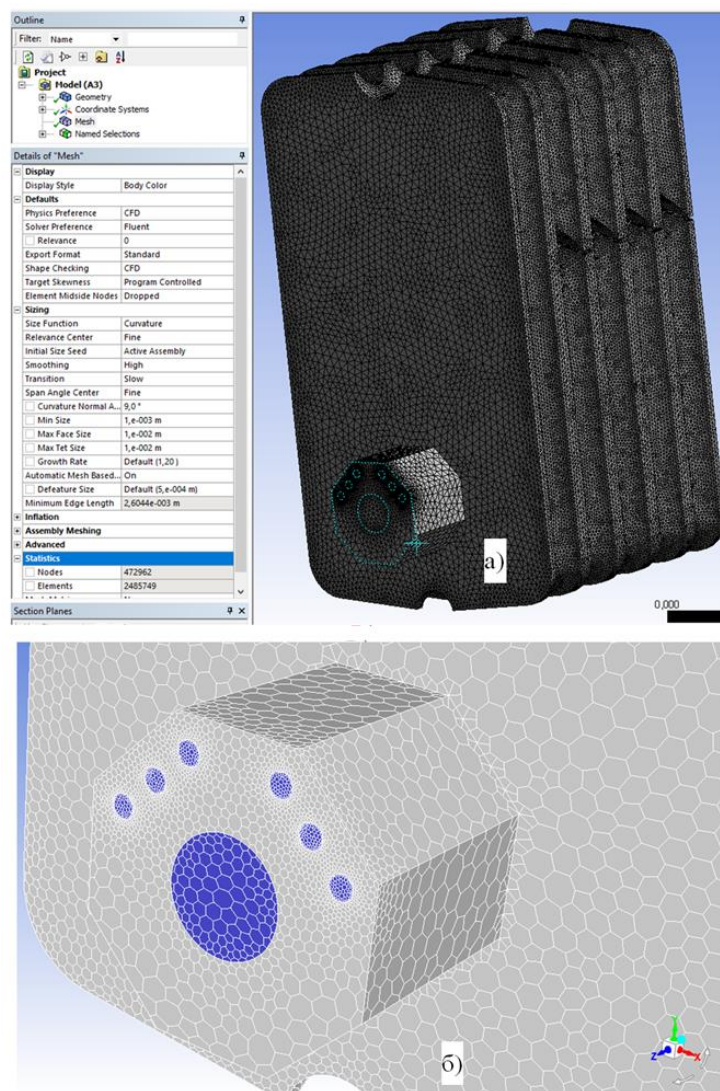


Рисунок 3.3 – Тетраедрична розрахункова сітка (а) та розрахункова сітка типу «Polyhedra» (б) у програмному пакеті ANSYS Fluent

Відомо, що перенос імпульсу і маси в хімічно реагуючих потоках описується складною нелінійною системою рівнянь в часткових похідних. Комп'ютерна модель горіння твердого палива в середовищі програмного комплексу ANSYS-Fluent включає рівняння нерозривності, осереднені рівняння збереження енергії, імпульсу і маси (рівняння Нав'є-Стокса), а також рівняння переносу  $i$ -го компонента суміші. Для моделювання складових тензора напруг Рейнольдса використовується підхід Буссінеска, який є найбільш поширеним при числовому моделюванні.

Для замикання осереднених по Рейнольдсу рівнянь Нав'є-Стокса використовувалась Realizable  $k$ - $\epsilon$  модель турбулентності, що забезпечує позитивність нормальних напруг ( $\overline{(u'_i)^2} \geq 0$ ) і виконання нерівності Шварца:  $\overline{(u'_i u'_j)} \leq \overline{(u'_i)^2} \cdot \overline{(u'_j)^2}$ . Транспортні рівняння для  $k$  та Realizable моделі турбулентності можна знайти в [63]. Використання в розробленій CFD-моделі обрано тому, що вона розроблена для потоків, що містять струмені (вприскування 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 [9], які краще прогнозують виникнення від'ємного градієнту тиску і зворотних течій, ніж стандартні пристінні функції.

Для визначення гідродинамічних характеристик потоку використана модель горіння без попереднього змішування (non-premixed combustion model). Використання цієї моделі передбачає створення PDF таблиці (probability distribution function – функція розподілу вірогідності). Цей файл містить інформацію про залежність змісту компонентів і температур від фракційного складу суміші і використовується ANSYS-Fluent для отримання цих значень в процесі розв'язку.

Для визначення PDF-таблиці використані рівняння рівноважної хімії з вищою точністю, що дозволяє враховувати ефекти проміжних реакцій і реакцій дисоціації, забезпечуючи більш реалістичні прогнози температури полум'я, ніж модель Eddy-Dissipation. Для коректного прогнозу утворення NO<sub>x</sub> використана опція Laminar Flameless, яка враховує нерівноважні ефекти, такі як надрівноважна концентрація радикалів і субрівноважні температури. Дослідження ставить за мету визначення значень хімічних компонентів реакції для сухої знезоленої маси та «робочої» маси.

### 3.4. Аналіз та верифікація результатів моделювання

Для аналізу результатів комп'ютерного моделювання було використано візуалізацію полів температур у взаємодії палива та окислювача, виходу летких сполук та ступеня вигорання вуглецю у центральній перетині топкової камери для різних режимів навантаження котлу.

Рисунок 3.4 демонструє поле температур у топковій камері. Високотемпературна зона відповідає розвитку факелу, що формується за допомогою примусового обдування підігрітого палива на спеціально обладнаній запальним тенем платформі пальника. Значні швидкості подачі окисника на деяких режимах сприяють безпосередньому контакту високотемпературних продуктів спалювання з фронтною стінкою топкової камери.

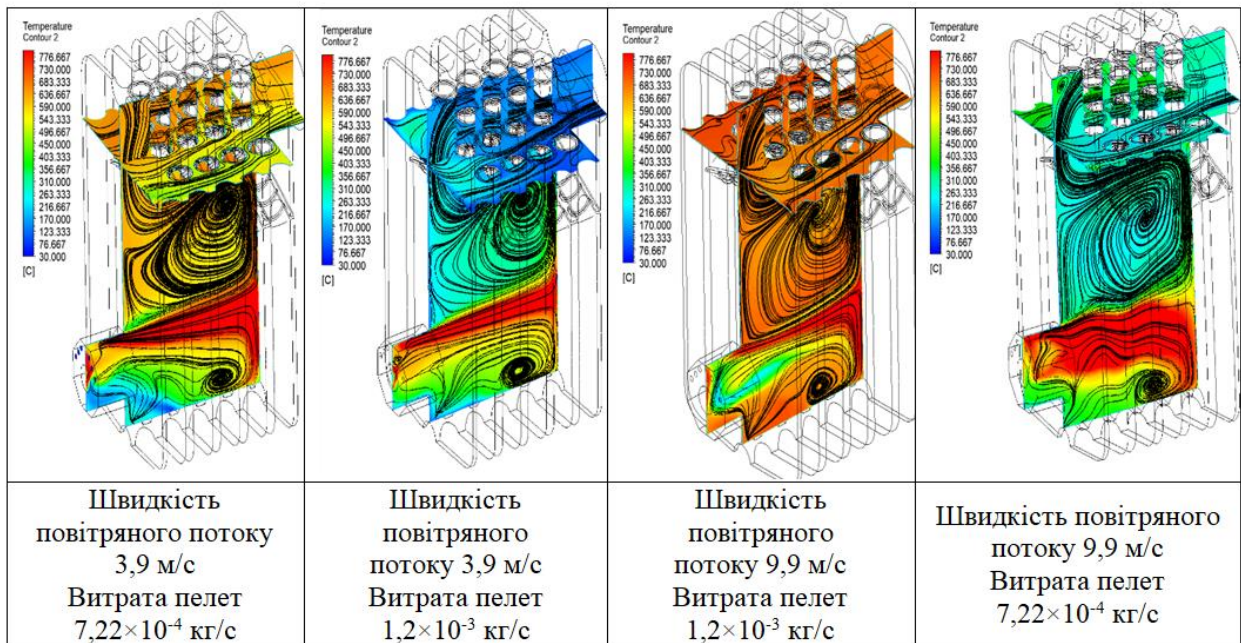


Рисунок 3.4 – Поле температур продуктів горіння деревних пелет

Аналіз Рисунка 3.4 вказує на рівномірне температурне поле у розрізі топки, за винятком об'ємної зони факелу. Спостерігаються високі температури



у зоні виходу продуктів спалювання з топки до димоходу (понад 300 °С), що є типовим для топкових камер котлів, де в якості палива використовуються пелети.

Пакет програм ANSYS-Fluent, використаний для моделювання, дозволяє широко аналізувати та візуалізувати розрахункові параметри. На Рисунку 3.5 представлений розподіл середньої концентрації змішаної фракції, що вказує на межі, де вуглець і летючі речовини переходять з твердої в газову фазу. Результати слід інтерпретувати як моделювання виходу твердих частинок. Процес утворення летючих твердих частинок є важливим при спалюванні твердих палив і потребує контролю під час експлуатації твердопаливних котлів. Найбільш інтенсивний процес переходу до газової фази відбувається у пальнику і в області факелу, але зі зміною режиму горіння, реакція вуглецю уповільнюється, займаючи при цьому майже весь об'єм топки.

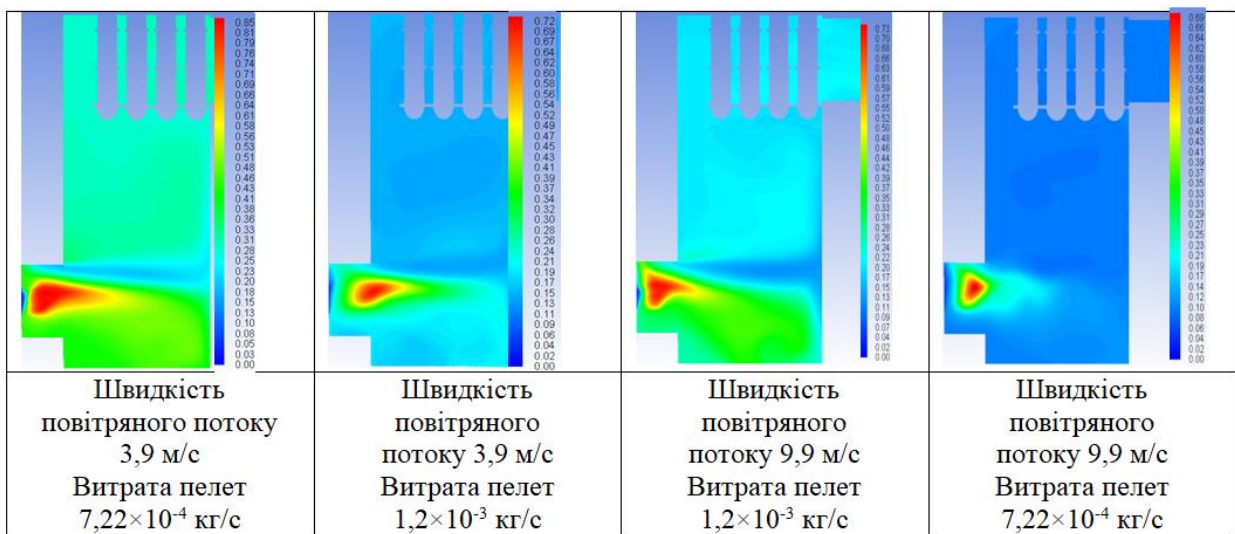


Рисунок 3.5 – Розподіл параметру Mean Mixture Fraction у центральному перерізі топкової камери

На Рисунках 3.6 і 3.7 відповідно представлені результати моделювання параметрів Evaporation/Devolatilization (DPM вихід летючих) та DPM Burnout (ступінь вигорання вуглецю).

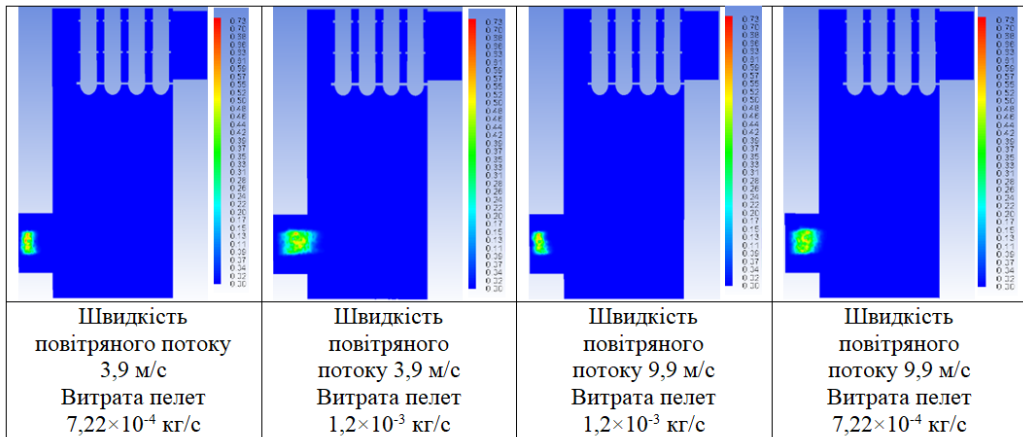


Рисунок 3.6 – Візуалізація виходу летких сполук у центральному перерізі топкової камери для різних режимів навантаження установки.

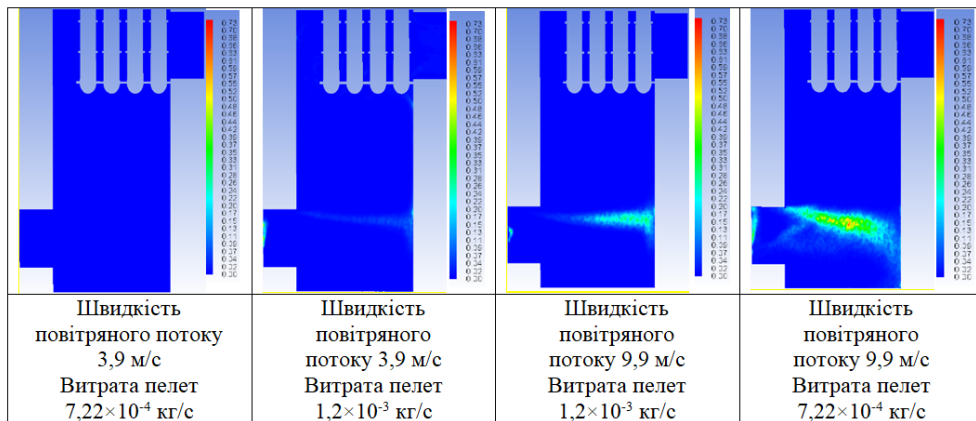


Рисунок 3.7 – Візуалізація ступеню вигорання вуглецю у центральному перерізі топкової камери для різних режимів навантаження установки.

На Рисунку 3.8 представлені результати моделювання розподілу масової долі компонента CO.

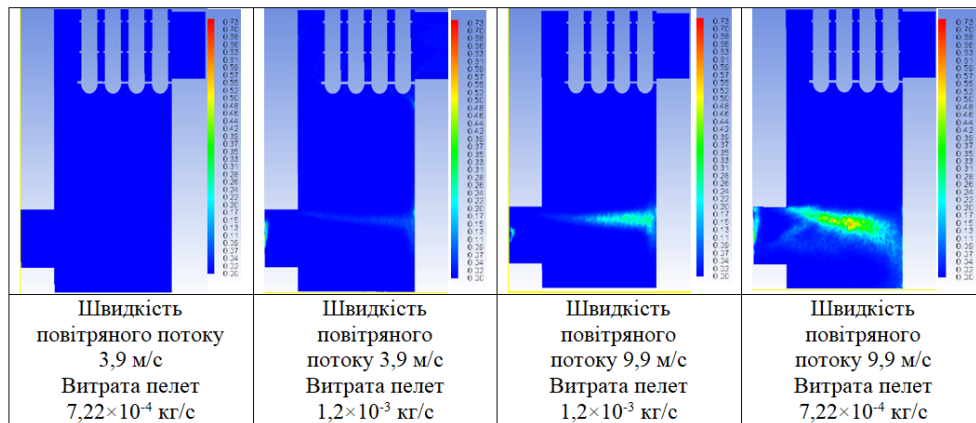


Рисунок 3.8 – Візуалізація розподілу масової долі компонента CO у центральному перерізі топкової камери для різних режимів навантаження установки.

На всіх наданих графіках (Рисунки 3.5–3.8) можна спостерігати, що розвинений факел реакційних компонентів палива добре видно для всіх розрахункових режимів. Цей факел горить горизонтально, практично відбиваючись від фронтної стінки топкової камери і заповнює як нижню, так і загальну частину об'єму продуктами горіння. Розрахунки також вказують, що верхня частина топкової камери до теплообмінника має більш рівномірний температурний розподіл порівняно з нижньою частиною. На більшості режимів відбувається заходження факелу холодним повітрям, і реакція окиснення вуглецю сповільнюється (Рисунок 3.8). Інтенсивне згорання летких речовин у вуглекислий газ (CO) відбувається в області полум'я та в каналі пальника. Порівняння з температурними полями на Рисунку 3.4 вказує на відповідність зон високої інтенсивності окиснення CO та зон з температурою  $>550$  °C. Турбулентність є ще одним фактором, який визначає остаточну картину швидкостей реакції горіння. Реакції між CO та CO<sub>2</sub> мають високу інтенсивність на вході в першу частину конвективного теплообмінника через високу концентрацію CO, високі температури для спалювання CO і підвищений рівень турбулентності, який забезпечується обтіканням оребрених труб.

Результати також показують, що частина повітря для горіння, що виходить з пальника і тече під полум'ям, є надлишковою для процесів горіння, утворюючи там холодні зони, що можуть обмежувати швидкість реакцій горіння.

Розподіл наведених параметрів корелюється з гідродинамічною картинною руху реакційної суміші, представленою на Рисунку 3.7. Топкова камера в об'ємі обмежена "водяною сорочкою". Верхню частину камери займає теплообмінник, який є додатковою секцією гідравлічної системи котла і складається з оребрених труб. Така секційна конструкція дозволяє отримувати необхідну потужність, а збільшення площі теплообміну через теплообмінник підвищує ефективність утилізації теплоти відхідних газів. Отримані температурні градієнти показують, що температура теплоносія на виході становить  $57\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що відповідає робочому режиму опалювальної системи, і розрахунковий підігрів води у котлі не суперечить паспортним даним і не перевищує  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Швидкість циркуляції обрана враховуючи паспортні характеристики і складає  $1\text{ м/с}$  (Рисунок 3.9).

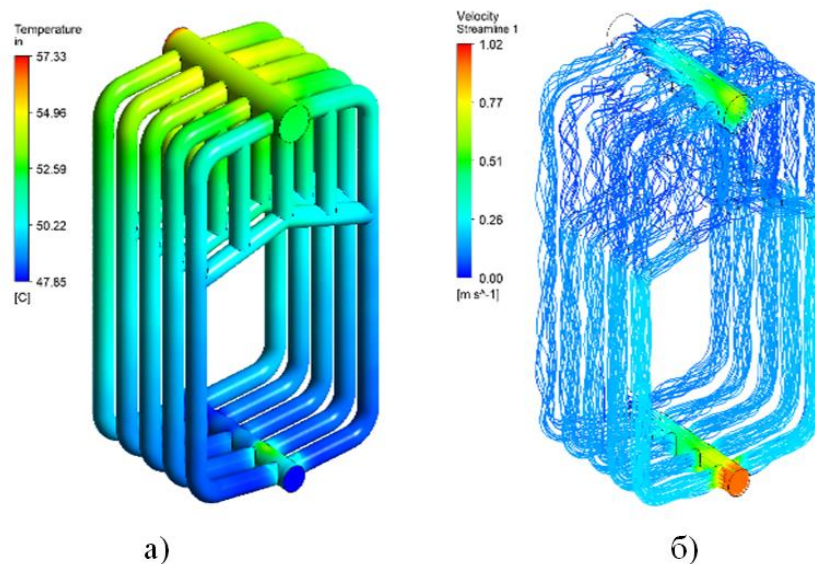


Рисунок 3.9 – Візуалізація поля температур (а) і швидкості (б) теплоносія, що рухається в «водяній сорочці» яка огортає топкову камеру котла.

## Висновки до третього розділу

1. Розроблено комп'ютерну модель процесу горіння, яка дозволяє проводити досить точну оцінку аеродинамічної структури потоку в пальниках і топці котла, в яку даний пальник встановлено, а також емісійних характеристик викидів при спалюванні пелет у випадку коли точно задані теплофізичні властивості спалюємого палива.

2. Доведено, що зона високої інтенсивності доокиснення CO повністю співпадає з об'ємною зоною існування факелу, де температура розжарених газів досягає 800 °С.

3. Проведено аналіз і верифікацію результатів комп'ютерного моделювання шляхом порівняння розрахункового підігріву води у моделі «водяної сорочки» топкової камери і паспортних даних котла. Швидкість циркуляції води також повністю співпадає з паспортними даними і складає 1 м/с.

## ВИСНОВКИ

Сучасні виклики у сфері енергетики та захисту навколишнього середовища надають велике значення вивченню та оптимізації процесів горіння. Дослідження в цій галузі є ключовим для покращення ефективності виробництва, зниження викидів та забезпечення стійкості екології.

Процеси горіння, які відбуваються в різних галузях, включаючи теплоенергетику та промислові процеси, вимагають наукового дослідження та вдосконалення.

Основні висновки по роботі:

1. Проведено оглядовий аналіз літературних джерел, що стосується сучасної теорії горіння. Ознайомлення з фізико-хімічними аспектами явища горіння та його класифікацією дало можливість зрозуміти основні принципи цього процесу.

2. Проведено аналіз сучасних мультифізичних платформ для моделювання фізичних та хімічних процесів. Визначено, що комп'ютерне моделювання допомагає розуміти, проектувати і оптимізувати процеси і пристрої з урахуванням реальних умов їх роботи. Точні мультифізичні моделі враховують широкий діапазон робочих умов і великий набір фізичних явищ.

3. Завдяки проведеному аналізу показано переваги пакету прикладних програм ANSYS-Fluent для моделювання процесів спалювання пелет в топковій камері пелетного котла.

4. На основі аналізу результатів комп'ютерного моделювання процесів спалювання пелет з твердих сортів деревини в топковій камері пелетного котла VIADRUS A0C за допомогою чисельних методів з використанням пакета прикладних програм ANSYS-Fluent доведено, що:

- модель дозволяє проводити досить точну оцінку аеродинамічної структури потоку в пальниках і топці котла, в яку даний пальник встановлено, а також емісійних характеристик викидів при

спалюванні пелет у випадку коли точно задані теплофізичні властивості спалюємого палива;

- зона високої інтенсивності доокиснення CO повністю співпадає з об'ємною зоною існування факелу, що де температура розжарених газів досягає 800 °С.

5. Проведено верифікацію результатів комп'ютерного моделювання шляхом порівняння розрахункового підігріву води у моделі «водяної сорочки» топкової камери і паспортних даних котла. Також встановлено, що швидкість циркуляції води повністю співпадає з паспортними даними і складає 1 м/с.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Учасники проєктів Вікімедіа. Чисельне моделювання – Вікіпедія. *Вікіпедія*. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Чисельне\\_моделювання](https://uk.wikipedia.org/wiki/Чисельне_моделювання) (дата звернення: 05.12.2023).
2. Simulink - Simulation and Model-Based Design. *MathWorks - Makers of MATLAB and Simulink - MATLAB & Simulink*. URL: <https://www.mathworks.com/products/simulink.html> (date of access: 05.12.2023).
3. OpenFOAM. *OpenFOAM*. URL: <https://www.openfoam.com/> (date of access: 05.12.2023).
4. Contributors to Wikimedia projects. ANSYS – Вікіпедія. *Википедия – свободная энциклопедия*. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/ANSYS> (дата звернення: 05.12.2023).
5. Contributors to Wikimedia projects. COMSOL Multiphysics - Wikipedia. *Wikipedia, the free encyclopedia*. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/COMSOL\\_Multiphysics](https://en.wikipedia.org/wiki/COMSOL_Multiphysics) (date of access: 05.12.2023).
6. COMSOL: Multiphysics Software for Optimizing Designs. *COMSOL*. URL: <https://www.comsol.com/> (date of access: 05.12.2023).
7. О программной системе ANSYS — Информационные консультации. *Информационные консультации*. URL: [http://ik.3dscorpion.com.ua/index.php?ukey=auxpage\\_95](http://ik.3dscorpion.com.ua/index.php?ukey=auxpage_95) (дата звернення: 06.10.2023).
8. Ansys Fluent | Расчет течений – МЦД. *МЦД*. URL: <https://www.cadfem-cis.ru/products/ansys/fluids/fluent/> (дата звернення: 06.10.2023).
9. CFD-моделювання процесів теплообміну і гідродинаміки засобами програмного комплексу: монографія / О. В. Баранюк, М. В. Воробйов А. Ю. Рачинський. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид. «Політехніка», 2023. 164 с.



10. Фигуровский Н. А. Очерк общей теории химии. От древнейших времён до начала XIX века. М : Наука, 1969. 414 с.
11. М.В. Ломоносов. Переписка 1737-1765. М. : Ломоносовъ, 2010. 513 с.
12. Самин Д. К. 100 великих научных открытий. М.: Вече, 2002. 480 с.
13. М. В. Ломоносов. Избранное в 2-х томах. М. : Наука, 1986.
14. Lavoisier A. L. Opuscules physiques et chimiques. Tome premier. Paris : Durand [etc.], 1774. 436 p.
15. Хитрин Л. Н. Физика горения и взрыва. М., 1957. 442 с.
16. Mallard E., Le Chatelier H. Sur la vitesse de propagation de l'inflammation dans les melanges explosifs. Compt. Rend. Acad. Sci. 1881. Vol. 93. P. 145–148.
17. Mallard, Le Chatelier. Étude sur la combustion des mélanges gazeux explosifs. Journal de Physique Théorique et Appliquée. 1882. Vol. 1, no 1. P. 173–183. URL : <https://doi.org/10.1051/jphystap:018820010017301> (date d'accès : 03.10.2023).
18. Mallard, Le Chatelier. Recherches sur la combustion des mélanges gazeux explosifs. Journal de Physique Théorique et Appliquée. 1885. Vol. 4, no 1. P. 59–84. URL : <https://doi.org/10.1051/jphystap:01885004005901> (date d'accès : 03.10.2023).
19. Michelson W. Ueber die normale Entzündungsgeschwindigkeit explosiver Gasmischen. Annalen der Physik. 1889. Bd. 273, Nr. 5. S. 1–24. URL: <https://doi.org/10.1002/andp.18892730502> (Zugriff am: 06.10.2023).
20. Михельсон В. А. О нормальной скорости воспламенения гремучих газовых смесей : Собрание сочин. М.: Новый агроном, 1930. Т. 1. С. 112-132.
21. Михельсон В. А. О нормальной скорости воспламенения гремучих газовых смесей. Ученые записки Императорского Московского университета. Отделение физ.-мат. 1893. № 10. С. 1–92.
22. Jouguet É. Mécanique des explosifs : étude de dynamique chimique. Paris : Octave Doin et fils, 1917. 556 p.
23. Chapman D. L. On the rate of explosion in gases. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. 1899. Vol. 47, no. 284.

P. 90–104. URL: <https://doi.org/10.1080/14786449908621243> (date of access: 03.10.2023).

24. Зельдович Я. Б. К теории распространения детонации в газообразных системах. ЖЭТФ. 1940. Т. 10, № 5. С. 542–568.

25. Зельдович Я. Б. О распределении давления и скорости в продуктах детонационного взрыва, в частности при сферическом распространении детонационной волны. ЖЭТФ. 1942. Т. 12, № 9. С. 389–406.

26. Зельдович Я. Б. Теория горения и детонации газов. М., 1944. 71 с.

27. Семенов Н. Н. Цепные реакции. Ленинград : ОНТИ, 1934. 535 с.

28. Semenov N. N. Тепловая теория горения и взрывов. Uspekhi Fizicheskikh Nauk. 1940. Т. 23, № 3. С. 251–292. URL:

<https://doi.org/10.3367/ufnr.0023.194003b.0251> (дата звернения: 03.10.2023).

29. Semenov N. N. Тепловая теория горения и взрывов. Uspekhi Fizicheskikh Nauk. 1940. Т. 24, № 8. С. 433–486. URL:

<https://doi.org/10.3367/ufnr.0024.194008a.0433> (дата звернения: 03.10.2023).

30. Семенов Н. Н., Зельдович Я. Б. Кинетика химических реакций в пламенах. ЖЭТФ. 1940. Т. 10, № 9-10. С. 1116–1136.

31. Кондратьев В. Н. Кинетика химических газовых реакций. М.: АН СССР, 1958. 688 с.

32. Зельдович Я. Б., Франк-Каменецкий Д. А. Теория теплового распространения пламени. ЖФХ. 1938. Т. 12, № 1. С. 100–105.

33. Зельдович Я. Б. Теория предела распространения тихого пламени. ЖЭТФ. 1941. Т. 11, № 1. С. 159–169.

34. Зельдович Я. Б., Воеводский В. В. Тепловой взрыв и распространение пламени в газах. М.: ММИ, 1947. 294 с.4

35. The Nobel Prize in Chemistry 1956. NobelPrize.org. URL: <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1956/summary/> (date of access: 03.10.2023).

36. Bone W. A. Flame and combustion in gases. London, New York : Longmans, 1927. 548 p.
37. Lewis B., von Elbe G. Combustion, flames and explosions of gases. Cambridge [Eng.] : The University press, 1938. 415 p.
38. Jost W. Explosions- und Verbrennungsvorgänge in Gasen. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1939. 616 S. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-50651-2> (Zugriff am: 03.10.2023).
39. Lewis B., von Elbe G. Combustion, flames, and explosions of gases. New York : Academic Press, Inc., 1951. 795 p.
40. Gaydon A. G. Spectroscopy and combustion theory. 2nd ed. London : Chapman & Hall, 1948. 242 p.
41. Gaydon A. G., Wolfhard H. G. Flames: Their structure, radiation, and temperature. London : Chapman & Hall, 1953. 340 p.
42. Вершинин Н. Н., Козлов Г. В., Григорьев Ю. А. Теория горения и взрыва : учебн. пособие. Пенза : ПГУ, 2014. 156 с.
43. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение: физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ / ред. П. Власов ; пер. з англ. Г. Агафонов. М.: Физматлит, 2003. 352 с.
44. Joule J. P. On the Heat evolved during the Electrolysis of Water. Memoirs of the Literary and Philosophical Society of Manchester. 1843. Vol. 7. P. 87–112.
45. Helmholtz H. Über die Erhaltung der Kraft. Berlin : Reimer, 1847. 72 S.
46. ENplus - Technical documentation. *ENplus - Home*. URL: <https://enplus-pellets.eu/en-in/resources-en-in/technical-documentation-en-in.html> (date of access: 05.12.2023).
47. Heletukha H.H., Zheliezna T.A., Drahniev S.V. Analysis of barriers to biomass energy production in Ukraine. Analytical note. BAU № 21. URL: <https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/01/position-paper-uabio-21-ua.pdf>
48. Стратегія розвитку біоенергетики в Україні. *UABIO*. URL: <https://uabio.org/bioenergy-transition-in-ukraine> (дата звернення: 05.12.2023).

49. Numerical investigation of biomass co-combustion with methane for NO<sub>x</sub> reduction / A. Zhou et al. *Energy*. 2020. Vol. 194. P. 116868. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116868> (date of access: 05.12.2023).

50. CFD simulation and optimization of industrial boiler / S. Echi et al. *Energy*. 2019. Vol. 169. P. 105–114. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.006> (date of access: 05.12.2023).

51. Nekhamin, M., Beztseynyi, I., Dunayevska, N. & Vyfatnuik, V. (2020). On using the ANSYS FLUENT software for calculating the process of burning a mixture of particles from different types of solid fuels. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(8 (106)), 48–53. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209762>.

52. Bhuiyan, A.A., Naser, J. (2015). CFD modelling of co-firing of biomass with coal under oxy-fuel combustion in a large scale power plant. *Fuel*, 159, 150–168. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.05.011>.

53. Lee, YW., Ryu, C., Lee, WJ. & Park YK. (2011). Assessment of wood pellet combustion in a domestic stove. *The Journal of Material Cycles and Waste Management*; 13 (3), <https://doi.org/10.1007/s10163-011-0014-0>.

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

55. Agro-pellets for domestic heating boilers: Standard laboratory and real life performance / V. K. Verma et al. *Applied Energy*. 2012. Vol. 90, no. 1. P. 17–23. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.079> (date of access: 05.12.2023).

56. Horvat I, Dovic D, Filipovic 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.

57. Okasha F. Modeling combustion of straw-bitumen pellets in a fluidized bed. *Fuel Processing Technology*. 2007. Vol. 88, no. 3. P. 281–293. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2006.10.012> (date of access: 05.12.2023).

58. Що потрібно знати про викиди твердопаливних котлів | ALTEP. *Altep - виробник твердопаливних котлів та опалювального обладнання*. URL: <https://altep.ua/articles/pro-vikidi> (дата звернення: 05.12.2023).

59. Паливні пелети: характеристики та види - Галмет-Україна Galmet. *Галмет-Україна*. URL: <https://galmet.com.ua/yak-tse-pratsyuye/palyvni-pelety-harakterystyky-ta-vydy.html> (дата звернення: 05.12.2023).

60. Все про пелети. URL: <http://liberator.com.ua/ua/vse-pro-peleti/> (дата звернення: 05.12.2023).

61. Kessel Viadrus A0C LP - 5 Glieder - 20 kW - Kessel, Heizkessel, Gusskessel, Holzvergaser, Holzkessel, Pelletskessel und vieles mehr - Kotly.com.pl. *Kotly co, piece, grzejniki, bojtery, pereko, ogniwo, viadrus, części zamienne - Kotly.com.pl*. URL: <https://kotly.com.pl/produkt-kessel-viadrus-a0c-lp-5-glieder-20-kw-5177.html?l=de> (дата звернення: 06.10.2023).

62. Пеллетная горелка PellasX HYBRID 35. Купить Пеллетная горелка PellasX HYBRID 35. Цена в Украине - Тепло Без Газа. Тепло Без Газа. URL: <https://teplobezgaza.com.ua/pelletnaya-gorelka-pellasx-hybrid-35/> (дата звернення: 06.10.2023).

63. FLUENT 5.5. User's Guide. Fluent Inc., 2000. 563 p.

**АНОТАЦІЯ**  
**ДО МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ**  
СТУДЕНТА 2-го (МАГІСТЕРСЬКОГО) РІВНЯ ВИЩОЇ ОСВІТИ ГР. ОФ-21мп

**Кінзерського Антона**

---

(ПІБ)

На тему «Комп'ютерне моделювання процесів теплообміну в сучасних теплообмінних системах»

Науковий керівник д.т.н., професор, професор кафедри загальної фізики та моделювання фізичних процесів, Котовський Віталій Йосипович

---

(науковий ступінь, вчене звання, посада, ПІБ )

*Актуальність* Актуальність досліджень, проведених у даній роботі, полягає в їх важливості для сучасного світу, де проблеми енергетичної ефективності, екологічної стійкості та безпеки мають вирішальне значення. Вивчення процесів горіння та його моделювання у програмних пакетах таких як COMSOL Multiphysics та ANSYS Fluent сприяють покращенню розуміння і оптимізації теплових процесів, що відіграють критичну роль у промисловості, енергетиці, будівництві та багатьох інших галузях.

Ці дослідження вирішують питання ефективності та безпеки теплових процесів, сприяючи зниженню викидів, оптимізації енергетичних витрат та підвищенню стабільності роботи технологічних установок.

*Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами кафедри* \_\_\_\_\_

---

Науково-дослідна робота «Фізико-топологічне моделювання процесів у вакуумних приладах з індукційним керуванням» - д/р № 0118u003782 2018 -2023 р.

Науково-дослідна робота «Моделювання фізичних процесів в імпульсній магнетронній розпилювальній системі» - д/р № 0118u0033783 2018 -2023 р.

Об'єкт дослідження процеси, що протікають під час спалювання пелетів з деревини твердих сортів в комп'ютерній моделі топкової камери автоматичного котла на твердому паливі VIADRUS A0C.

Предмет дослідження автоматичний котел на твердому паливі VIADRUS A0C потужністю 20 кВт, в якості палива в якому використовувались дерев'яні пелети, що подавались в факельний пальник розроблений компанією PellasX з витратою 2 кг/с при швидкості нагнітаємого феном повітря 7,5 м/с з температурою 300 °С.

Мета роботи Основною метою даного дослідження є підготовка комп'ютерної моделі водогрійного котла VIADRUS A0C (Польща), що буде використана для подальшої розробки, вдосконалення та впровадження пальників для спалювання пелет сільськогосподарського походження, а також визначення основних закономірностей процесу їх горіння й дослідження впливу режимних параметрів на розподіл температур в топковій камері, а також дослідження

характеристик біоенергетичних трав'янистих та деревних культур як біопаливної сировини.

Методи дослідження методи математичної фізики, фізико-математичного моделювання і чисельного розрахунку за допомогою академічної ліцензії програмного комплексу ANSYS Student

Відомості про обсяг звіту, кількість ілюстрацій, таблиць, додатків і літературних найменувань за переліком використаних В роботі наведено: використаної літератури - 63, сторінок - 101, рисунків - 36, таблиць - 3.

Мета індивідуального завдання, використані методи та отримані результати \_\_\_\_\_

Головні цілі індивідуального завдання:

1. Провести оглядовий аналіз літературних джерел щодо сучасної теорії горіння. Ознайомитись з теоретичними аспектами явища горіння, як фізико-хімічного процесу, визначити його класифікацію.

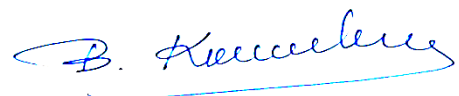
2. Провести аналіз сучасних мультифізичних платформ для моделювання фізичних та хімічних процесів.

3. Обґрунтувати вибір пакету прикладних програм ANSYS-Fluent та провести в ньому моделювання процесів спалювання пелет в топковій камері визначеного котла

4. Обґрунтувати точність оцінки аеродинамічної структури потоку в пальниках і топці котла, при точно заданих теплофізичних властивостях спалюваного палива та провести верифікацію моделювання.

Висновок В рамках даної роботи був проведений аналітичний оглядовий аналіз літературних джерел, що стосується сучасної теорії горіння. Автор ознайомився з фізико-хімічними аспектами явища горіння та його класифікацією, що дало можливість зрозуміти основні принципи цього процесу. Проведено аналіз сучасних мультифізичних платформ для моделювання фізичних та хімічних процесів, що надало можливість визначити переваги пакету прикладних програм ANSYS-Fluent для моделювання процесів спалювання пелет в топковій камері визначеного котла. Під час дослідження було обґрунтовано точність оцінки аеродинамічної структури потоку в пальниках і топці котла за умови точно заданих теплофізичних властивостей спалюваного палива. Проведена верифікація результатів комп'ютерного моделювання, яка показала високу точність розрахунків, що підтверджує надійність методології дослідження, що використовується у цій роботі.

Перелік ключових слів (не більше 20) Процеси горіння, теплові процеси, енергетична ефективність, гідродинаміка, теплообмінні апарати, автоматичні пелетні котли, моделювання теплових процесів, мультифізичні платформи, ANSYS



Підпис керівника \_\_\_\_\_

**SUMMARY**  
**TO THE MASTER THESIS**

2<sup>nd</sup> YEAR STUDENT OF THE SECOND LEVEL OF HIGHER EDUCATION (MASTER LEVEL),

GR. OF-21mp

**Kinzerskyi Anton**

---

(FULL NAME)

*On the topic Computer modeling of heat exchange processes in modern heat exchange systems*

---

*Scientific supervisor Professor of the Department of General Physics and Physical Modeling of processes, doctor of technical sciences, professor Vitaly Yosypovych Kotovskyi*

(scientific degree, academic title, position, FULL NAME)

*Actuality The relevance of the research carried out in this work lies in its importance for the modern world, where the problems of energy efficiency, environmental sustainability and safety are of crucial importance. The study of combustion processes and its simulation in software packages such as COMSOL Multiphysics and ANSYS Fluent contribute to the improvement of understanding and optimization of thermal processes that play a critical role in industry, energy, construction and many other industries.*

*These studies solve the issue of efficiency and safety of thermal processes, contributing to the reduction of emissions, optimization of energy costs and increasing the stability of the operation of technological installations.*

---

*Relationship of work with scientific programs, plans, themes of the department \_\_\_\_\_*

---

*Research work "Physico-Topological Modeling of Processes in Vacuum Devices with Inductive Control" - project No. 0118u003782 2018-2023.*

*Research work "Modeling Physical Processes in Pulse Magnetron Sputtering System" - project No. 0118u0033783 2018-2023.*

---

*Object of research Processes occurring during the combustion of wood pellet fuels in the computational model of the combustion chamber of the automatic solid fuel boiler VIADRUS A0C.*

*Subject of research The automatic solid fuel boiler VIADRUS A0C with a capacity of 20 kW, fueled by woody pellets supplied to a burner developed by PellasX at a rate of 2 kg/s with an induced air velocity of 7.5 m/s at a temperature of 300 °C.*

---

*Purpose of work The main goal of this research is to prepare a computer model of the VIADRUS A0C water boiler (Poland), which will be used for further development, improvement, and implementation of burners for burning pellets of agricultural origin. Additionally, the study aims to identify the fundamental patterns of their combustion process, investigate the influence of operational parameters on the temperature distribution in the combustion chamber, and explore the characteristics of bioenergy herbaceous and woody crops as biofuel raw materials.*

---



Research methods *Methods of mathematical physics, physical-mathematical modeling, and numerical calculation using an academic license of the ANSYS Student software package.*

---

Information about the volume of the thesis, the number of illustrations, tables, applications and references in the list of used ones *The work contains: references - 63, pages - 101, figures - 36, tables - 3.*

---

The purpose of the individual task, the methods used and the results obtained \_\_\_\_\_

---

**Main Objectives of the Individual Task:**

**1. Conduct a comprehensive review of literature regarding the contemporary theory of combustion. Familiarize yourself with the theoretical aspects of the combustion phenomenon as a physico-chemical process and determine its classification.**

**2. Analyze modern multiphysics platforms for modeling physical and chemical processes.**

**3. Justify the selection of the ANSYS-Fluent package for applied programs and perform modeling of pellet combustion processes in the combustion chamber of a specified boiler.**

**4. Substantiate the accuracy of assessing the aerodynamic structure of the flow in the burners and boiler combustion chamber, assuming precisely defined thermophysical properties of the combusted fuel, and conduct modeling verification.**

---

**Conclusion *Within the scope of this work, an analytical review of literature related to modern combustion theory was conducted. The author familiarized themselves with the physico-chemical aspects of the combustion phenomenon and its classification, providing insights into the fundamental principles of this process. An analysis of modern multiphysics platforms for modeling physical and chemical processes was carried out, identifying the advantages of the ANSYS-Fluent software package for modeling pellet combustion processes in the designated boiler's combustion chamber. The study justified the accuracy of assessing the aerodynamic structure of the flow in the burners and boiler combustion chamber under precisely defined thermophysical properties of the combusted fuel. The verification of the computer modeling results demonstrated high accuracy in calculations, confirming the reliability of the research methodology employed in this work***

---

**Keyword list (no more than 20) *Combustion processes, thermal processes, energy efficiency, hydrodynamics, heat exchange devices, automatic pellet boilers, modeling thermal processes, multiphysics platforms, ANSYS.***

---

Signature of the supervisor 