

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет
Кафедра комп'ютеризованих систем управління

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КСУ

_____ Т. В. Коротка

_____ 2021 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

зі спеціальності 151- Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
на тему: "РЕСУРСОЗБЕРЕЖНЕ УПРАВЛІННЯ РЕЖИМАМИ РОБОТИ ВОДОГРІЙНОГО
КОТЛА З ДВОКАМЕРНИМ НАГРІВАЧЕМ"

Керівник роботи

к. т. н., доцент

В. Д. Черв'яков

Дипломник

студент гр. СУ.м-01

О. С. Соколов

РЕФЕРАТ

Соколов Олександр Сергійович. Ресурсозбережне управління режимами роботи водогрійного котла з двокамерним нагрівачем. Кваліфікаційна робота магістра. Сумський Державний Університет, Суми, 2021 р.

Робота містить 47 сторінок основного тексту, 27 рисунків, 6 таблиць; 1 додаток; список використаних джерел з 21 найменувань.

Робота присвячена дослідженню теплообмінної системи водогрійного котла з двокамерним нагрівачем. Запропоновані рішення дозволяють підвищити КПД водогрійного піролізного котла, а також зменшити час перехідного процесу.

Ключові слова: піролізний котел, управління, ПІД -регулятор, адаптивна система, моделювання.

ABSTRACT

Sokolov Alexander Sergeevich. Resource-saving control of boiler operation modes with two-chamber heater. Qualification work of the master. Sumy State University, Sumy, 2021

The work contains 47 pages of the main text, 27 figures, 6 tables; 1 appendix; list of used sources from 21 names.

The work is devoted to the study of the heat exchange system of a water boiler with a two-chamber heater. The proposed solutions allow to increase the efficiency of the pyrolysis boiler, as well as to reduce the transient time.

Key words: pyrolysis boiler, control, PID-regulator, adaptive system, modeling.

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет
Кафедра комп'ютеризованих систем управління

ЗАТВЕРДЖУЮ
В.о. зав. кафедри

Коротка Т.В.
“ _____ “ _____ “ 2021 р.

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу магістра

Тема роботи: Ресурсозбережне управління режимами роботи водогрійного котла з двокамерним нагрівачем. Затверджено наказом ректора університету №

Термін подання закінченої роботи 25.12.2021 р.

Вихідні дані до роботи: завдання кафедри, технічна документація, джерела інформації відкритого доступу.

Зміст роботи: конструктивно-технологічна характеристика водогрійного піролізного котла, моделювання теплообмінної системи, Дослідження режимів роботи теплообмінної системи з піролізним котлом, техніко-економічні розрахунки

Графічні матеріали: функціональна схема автоматизації

Календарний план

Номер етапу	Зміст етапу проектування	Терміни виконання
1	Аналіз завдання кафедри. Підбір та аналіз літератури	02.11.2021 – 10.11.2021
2	Конструктивно-технологічна характеристика об'єкта автоматизації.	11.11.2021 – 15.11.2021
3	Моделювання теплообмінної системи з водогрійним піролізним котлом	16.11.2021 – 20.11.2021
4	Дослідження режимів роботи теплообмінної системи з піролізним котлом	21.11.2021 – 10.12.2021
5	Техніко-економічні розрахунки адаптивної системи з водогрійним піролізним котлом	11.12.2021 – 20.12.2021
6	Технічне оформлення кваліфікаційної роботи та її презентації. Перевірка на відсутність плагіату. Подання роботи до захисту.	21.12.2021 – 31.12.2021

Дата видачі завдання «01» 11. 2021 р

Керівник проекту:

к. т. н., доцент

Черв'яков В. Д.

До виконання прийняв:

студент групи СУМ-01

Соколов О. С.

ЗМІСТ

	С
СПИСОК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	5
ВСТУП.....	6
1 Конструктивно-технологічна характеристика водогрійного піролізного котла.....	9
1.1 Загальна характеристика піролізного котла як технологічної системи.....	9
1.1.1 Класифікація твердопаливних котлів.....	9
1.1.2 Характеристика твердопаливних котлів.....	11
1.2 Принцип роботи піролізного котла.....	12
1.3 Тепловий ККД та ефективність піролізного котла.....	13
1.4 Конструкції піролізних котлів.....	14
1.5 Переваги та недоліки піролізних котлів.....	17
1.6. Вихідна модель теплообмінної системи піролізного котла.....	19
1.7. Спрощена модель теплообмінної системи.....	21
2 Моделювання теплообмінної системи.....	27
2.1 Постановка задачі для дослідження системи керування піролізним котлом.....	27
2.2 Імітаційне моделювання теплообмінних процесів.....	27
3 Дослідження режимів роботи теплообмінної системи з піролізним котлом.....	34
3.1 Дослідження системи без регулятора температури.....	34
3.2 Дослідження системи з ПД - регулятором температури.....	35
3.3 Дослідження адаптивної теплообмінної системи з піролізним котлом.....	43
4 Техніко-економічні розрахунки.....	46
ВИСНОВКИ.....	48
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	52
Додаток А.....	52

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АСУ – автоматична система управління

ВМ – виконавчий механізм

ККД – коефіцієнт корисної дії

ПІД – пропорційно-інтегрально-диференціальний

ТОС- теплообмінна система

ВСТУП

З моменту появи людських цивілізацій виникли проблеми з використання природних енергоресурсів. Це стосується різних сфер людської діяльності, починаючи з промисловості і закінчуючи побутом. Декілька століть людство зазвичай використовувало невідновлювані джерела енергії такі як вугілля, газ, нафта. Спроби замінити їх відновлювальними не тільки не принесли результату, а ще і викликали техногенні і екологічні катастрофи. Наприклад, створення гідроелектростанцій спричинило затоплення великих площ плодородної землі та зміну природних умов. Спалення вугілля та природного газу є одним із факторів забруднення атмосфери та підвищення температури на Землі.

Тому пошук безпечних та відновлювальних джерел енергії та створення технічних пристроїв для енергоефективного та безпечного їх використання є актуальною проблемою сучасності.

Одним з технічних рішень є створення піролізного котла, який може працювати на будь-якому твердому природному паливі, має високий ККД, не забруднює атмосферу та може використовуватись в негазофікованих районах. Паливом для такого котла можуть використовуватися деревина, брикети, пелети, подрібнені гілки та тирса, торф та вугілля. Але найбільшу ефективність дає саме деревина завтовшки 70 – 100 мм, оскільки вона виділяє максимальну кількість газу [1].

Недоліками цього котла є висока чутливість піролізного горіння в топці цього котла до відхилень параметрів палива та повітря від нормативних значень для котла певного типу, що приводить до неповного використання теплотворної здатності палива.

Отже, актуальність роботи обумовлена швидким зростанням цін на енергоносії (нафта, газ та електрика), переходом до екологічно чистих технологій, а також стрімким зростанням будівництва будинків та котеджів, розташованих на відстані від газових магістралей. Опалювальна система з піролізним котлом стане доцільним рішенням для заміського будинку, дачі, лазні

та особливо корисна буде для деревообробних підприємств, промислових приміщень, де є безліч відходів деревини [2].

Задача підвищення енергоефективності процесу горіння твердого палива у піролізному котлі вирішується створенням адаптивної системи керування цим процесом.

Отримані результати можуть бути впроваджені у сфері систем опалення та гарячого водопостачання.

Об'єктом дослідження є адаптивна система управління котлом піролізного горіння.

Предметом дослідження є модель системи керування піролізним котлом.

Мета роботи – розробити та дослідити адаптивну систему керування котлом піролізного горіння та отримати оптимальні режими роботи піролізного котла за різних змін навантаження.

Завданнями дослідження були такі:

- аналіз видів та будови піролізних котлів і параметри, що впливають на його ефективність;
- проаналізувати математичну модель теплообмінної системи;
- промодельовати теплообмінну систему з піролізним котлом
- дослідити режими роботи теплообмінної системи з блоком адаптації,

ПД – регулятором

- розрахувати економічні параметри впровадження досліджень.

Наукова новизна:

- вперше запропонована адаптивна система управління температурою води піролізного котла
- Набула подальшого розвитку математична модель теплообмінної системи.

Теоретична значущість :

- проведені дослідження можуть бути використані при моделюванні твердопаливних котлів в теплоенергетиці.

Практична цінність :

- впровадження адаптивної системи керування температурою води піролізного котла надасть можливість підняти ККД котла до максимуму, що зменшить витрати палива на 3%.

1 КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ВОДОГРІЙНОГО ПІРОЛІЗНОГО КОТЛА

1.1 Загальна характеристика піролізного котла як технологічної системи

Підвищення енергоефективності є важливою проблемою сучасного суспільства. Існує великий інтерес до заміни нафти, вугілля, мазуту та газу відновлюваним паливом у виробництві теплової енергії. Одним з ефективних альтернативних джерел палива в котлах є використання піролізного газу.

Твердопаливний котел — це пристрій для утворення і передавання теплової енергії теплоносію з метою подальшого її використання для опалення [1].

Сучасні твердопаливні котли забезпечують якісне екологічно чисте спалювання і високий ступінь автоматизації.

Питанню підвищення ККД котлів та їх ефективності присвячені роботи І. Р. Ващишак [2], Канигіна О. В. [3], групі дослідників під керівництвом Olli Sippula [4]. Аналіз існуючих систем опалення та обігріву приміщень наведено в дослідженнях під керівництвом С. Ф. Кудашева [5], О. В. Шаповалова [6], К. В. Юхимчука [7], Безродного М. К. [8]. Моделювання систем парових котлів є провідною думкою робіт [9, 10].

1.1.1 Класифікація твердопаливних котлів

Існує велика кількість класифікацій твердопаливних котлів за різними ознаками.

За принципом завантаження палива котли поділяють на ручні, автоматичні та універсальні [1]. Автоматичні котли бувають як з ретортним пальником, так із факельним [1].

Типи пальників, які використовуються в котлах наведені нижче [13]:

- масляний пальник з повітряним розпиленням;
- атмосферний газовий пальник;
- двопаливний пальник;

- пальник з примусовою внутрішньою рециркуляцією (FIR);
- газовий пальник модуляційної потужності;
- пальник з модулюючим розпиленням під тиском;
- багатоступінчастий пальник з розпиленням під тиском;
- пальник включення-вимкнення;
- пальник преміксів;
- поверхневий пальник попередньої суміші;
- пальник із поверхнево-стабілізованим преміксом;
- пальник швидкого змішування;
- масляний пальник ротаційної чашки;
- одноступеневий газовий пальник;
- одноступеневий пальник з розпиленням під тиском;
- пальник ступінчастий газовий;
- масляний пальник з паровим розпиленням;
- пальник із наднизьким рівнем NO_x (ULNB).

За матеріалом теплообмінника котли поділяють на сталеві та чавунні.

За кількістю контурів обігріву твердопаливні котли бувають одноконтурними (їх використовують лише для опалення будинків) та двоконтурні (їх використовують не лише для опалення, але й для гарячого водопостачання).

За принципом горіння котли поділяють на котли з нижнім горінням, котли пошаровим горінням та котли з верхнім горінням.

В твердопаливних котлах використовують такі види палива [1]:

- вугілля;
- дрова;
- залишки деревообробки;
- дров'яні брикети;
- торф;
- торф'яні брикети;

- пелети;
- залишки агрообробки.

1.1.2 Характеристика твердопаливних котлів

Порівняння функціональних можливостей сучасних водогрійних котлів, які виготовляються та експлуатуються у США [3] наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняння функціональних можливостей котлів (за матеріалами роботи [3])

Характеристика	Тип котла		
	Чавунний	Жаротрубно-димогарний	Водотрубний
Ефективність	Низька	Висока	Середня
Площа для розміщення	Мала	Середня або велика	Мала
Експлуатаційні витрати	Середні або великі	Низькі	Середні
Вартість	Середня	Середня або висока	Низька або середня
Кількість наявних модифікацій	Мала	Велика	Середня
Призначення котла/межі робочого тиску	Генерація гарячої води та пари низького тиску /-	Генерація гарячої води та пари низького та високого тиску / 2,41 МПа	Генерація гарячої води та пари низького тиску /-
Максимальна теплова потужність	1,96 МВт	14,70 МВт	–

Сфера застосування	Опалення / технологічні потреби	Опалення / технологічні потреби	Опалення
--------------------	---------------------------------	---------------------------------	----------

Експлуатаційні характеристики системи подачі палива також залежать як від типу палива, так і від його стану (твердий, рідкий або газоподібний) [13].

Серед сучасних твердопаливних котлів найбільшу ефективність показали піролізні котли.

Згідно з [12], пристрій, що використовують для одержування піролізного газу за допомогою піролізу деревного палива.

Піролізом називають термічне розкладання як органічних та так і багатьох неорганічних сполук [11].

1.2 Принцип роботи піролізного котла

Піролізний котел складається з двох камер: генеруючої камери (камери, в якій спалюють паливо для отримання піролізного газу) та камери згорання (рис. 1.1). Тверде паливо надходить у генеруючу камеру. У генеруючій камері за допомогою невеликого вогню спочатку підпалюють дрова і вони починають горіти як у простому котлі. При досягненні температури 200 – 800 °С подачу кисню в камеру згорання зменшують. Горіння палива при зменшеній кількості кисню призводить до утворення піролізного газу, що за допомогою спеціальної труби спрямовують до камери згорання. Процес утворення газу відбувається з виділенням тепла.

У камері згорання піролізний газ змішують з повітрям, що має більш високу концентрацію кисню. Піролізний газ спалахує і починає горіти. Температура горіння піролізного газу може досягати 1100 – 1200 °С. Регулювання витрати повітря (а отже й концентрації кисню) здійснюють за допомогою засувки або шибера [14].

Горіння піролізного газу в камері згорання супроводжується бурхливим виділенням тепла, яке використовують для нагрівання води теплообмінника. Продукти згорання палива виводять у довкілля через димохід котла [16].

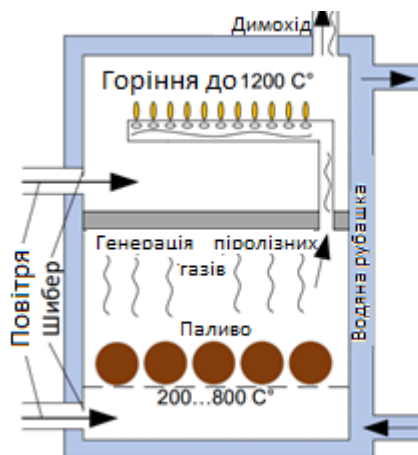


Рисунок 1.1 –Принцип роботи піролізного котла

1.3 Тепловий ККД та ефективність піролізного котла

Особливістю піролізних котлів є дуже високий їх тепловий ККД. Тепловим ККД котла називають той відсоток введеного тепла, який ефективно впливає на утворення пари. Так, ККД сучасних газогенераторних піролізних котлів (за словами виробників), варіюється в межах 84 – 95%. Проте, на ККД піролізного котла суттєво впливає ступінь вологості палива. Підвищена вологість палива спричиняє істотне виділення пари, яка, змішуючись з піролізним газом, зменшує його концентрацію, що, в свою чергу, значною мірою зменшує потужність горіння піролізного газу [12].

Існує два методи оцінки ефективності котла: прямий і непрямий [16].

При прямому методі оцінюють енергію робочого тіла (води та пари) порівняно з енергетичним вмістом палива у газоутворюючій камері котла.

Прямий метод також називають «методом введення-виведення» оскільки, при визначенні ефективності враховують лише корисний вихід (кількість пари)

та витрачене паливо. Ефективність котла при прямому методі можна оцінити за формулою (1.1) [16]:

$$E = \frac{Q \times (h_g - h_f)}{q \times GCV}, \quad (1.1)$$

де E – ефективність котла;

q – кількість палива, що використовується за годину, [кг/год];

GCV – повна теплотворна здатність палива, [ккал/кг палива];

h_g – ентальпія насиченої пари, [ккал/кг пари];

Q – кількість пари, що утворюється за годину, [кг/год];

h_f – ентальпія прісної води, [ккал/кг води].

При непрямому методі ефективність котла розраховують як різницю між виробленим теплом та витратами енергії [16].

1.4 Конструкції піролізних котлів

Незважаючи на те, що сучасна промисловість виготовляє велику різноманітність газогенераторних котлів різної конструкції, але принцип їх дії однаковий. Деякі приклади різних конструкцій піролізних котлів наведені на рисунку 1.2.

Піролізний котел має два основні відсіки (камери):

- завантажувальний відсік (газогенеруюча камера);
- топковий відсік (камера згорання).

Область камери згорання, де відбувається виділення тепла, називають зоною полум'я. Полум'я може бути багате піролізним газом, бідне піролізним газом або стехіометричне. Насичення полум'я газом оцінюють за допомогою параметра λ [11]:

$$\lambda = \frac{(m_{\text{повітря}} / m_{\text{палива}})_{\text{фактична}}}{(m_{\text{повітря}} / m_{\text{палива}})_{\text{стехіометрична}}} \quad (1.2)$$



Рисунок 1.2 – Різні конструкції піролізних котлів [11]

Полум'я називають стехіометричним, якщо $\lambda = 1$. В цьому випадку маса повітря відповідає теоретичній кількості, необхідній для повного згорання палива. Полум'я називають багатим паливом, якщо $\lambda < 1$. Це означає, що не увесь піролізний газ згорає, а деяка його частина виходить у димохід разом з чадними газами. Полум'я називають бідним паливом, якщо $\lambda > 1$. При такому полум'ї увесь піролізний газ буде спалений, а надлишок не використаного кисню забере корисне тепло і також вийде у димохід разом з чадними газами.

Залежно від місцезнаходження камери згорання піролізні котли поділяють на два види:

- котли з нижнім топковим відсіком;
- котли з верхнім топковим відсіком.

Найчастіше використовують котли з верхнім топковим відсіком.

Основні переваги і недоліки піролізних котлів з різним типом камери згорання наведені в таблиці 1.2.

Залежно від типу витяжної труби піролізні котли поділяють на такі:

- котли з природною тягою;
- котли з примусовою тягою.

Таблиця 1.2 – Порівняння котлів із різним типом камери згорання [6]

Вид топкового відсіку	Переваги	Недоліки
1	2	3
Нижній відсік	<ol style="list-style-type: none"> 1. Зручне завантаження палива у верхню газогенеруючу камеру. 2. Продукти горіння виводяться природним шляхом. 3. Не споживає електроенергію на роботу нагнітальних та циркуляційних пристроїв. 4. Більш оптимальний для дров. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Необхідно часто чистити камеру згорання від падаючого зверху попелу. 2. Залежність тяги від погодних умов та висоти димаря.
Верхній відсік	<ol style="list-style-type: none"> 1. Піролізний газ піднімається в топковий відсік природним шляхом. 2. Необхідно рідше чистити котел. 3. Більш оптимальний для вугілля. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Висока вартість котла 2. Висока вартість установки котла

Природну тягу одержують за рахунок різниці тисків з різних кінців високого димаря. Примусову тягу – за допомогою вентилятора або димососа, який треба живити від джерела електричної енергії. Піролізний котел із примусовою тягою більш ефективний, проте залежить від зовнішнього джерела живлення. У випадку відсутності зовнішнього джерела електричної енергії, або при короткочасному перериванню живлення необхідне додаткове джерело живлення, однак, вартість такого піролізного котла набагато збільшується.

Порівняльна таблиця піролізних котлів з примусовою та природною тягою наведена нижче.

Таблиця 1.3 – Переваги і недоліки котлів із примусовою та природною тягою [6]

Вид тяги	Переваги	Недоліки
1	2	3
Примусова	<ol style="list-style-type: none"> 1. Швидко прогрівається камера згорання. 2. Швидше починається процес піролізу деревини. 3. Продукти згорання виходять відразу у довкілля. 4. Автоматичне регулювання процесу піролізу та згорання газу. 5. Збільшується час роботи котла на одному завантаженню палива. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Залежність від електроенергії
Природна	<ol style="list-style-type: none"> 1. Невибагливий у обслуговуванні. 2. Більш надійний у експлуатації. 3. Значно нижча вартість. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Треба частіше чистити котел. 2. Висока вартість установки котла.

1.5 Переваги та недоліки піролізних котлів

Порівняно з традиційними твердопаливними котлам піролізні котли мають такі переваги [15]:

- за рахунок повного згорання палива і підвищеної температури горіння виділяється додаткова теплова енергія. При горінні летких речовин, які входять до складу піролізного газу, витрачається менше кисню порівняно з горінням дров у традиційному котлу;

- взаємодія летких складових піролізного газу з продуктами їх згорання, що суттєво зменшує викид важких речовин у довкілля;

- практично не утворюється сажа, оскільки при згоранні палива виділяється значно менше важких речовин порівняно з традиційними твердопаливними котлами;

- паливо згоряє повністю практично без залишку, залишком є лише жменька пилу;

- високий ККД, що досягає 95%;

- час робота котла між додаванням дров дорівнює 8 – 12 годин, що залежність від типорозмірів котла, температури доквілля, габаритів опалювальної площі;

- регулювання потужності котла від 30 до 100%;

- деякі моделі піролізних котлів дають можливість спалювати не лише традиційне паливо, а й гуму з полімерними сполуками.

До недоліків піролізних котлів можна віднести такі:

- залежність від зовнішньої електричної енергії для котлів з примусовою тягою, оскільки димосос або вентилятор піролізного котла споживає її;

- великогабаритні розміри піролізного котла;

- підвищені вимоги до вологості палива;

- газогенераторні котли в основному виготовляють одноконтурними для обігріву проточної води;

- температура зворотної води має бути 50 – 60 °С. Якщо температура падає нижче цього значення, то на зовнішньому устаткуванні котла виділяється конденсат, що знижує довговічність обладнання. Для збільшення довговічності внутрішні стіни котла виготовляють товщиною не меншою за 4 мм, що впливає на вагу котла [17];

- більш висока вартість піролізних котлів (в 1,5 – 2 рази вища) порівняно з вартістю стандартних котлів [15].

1.6. Вихідна модель теплообмінної системи піролізного котла

У роботі [18] описана модель теплообмінної системи, побудованої на основі піролізного котла. Для цього була взята модель теплообмінної нелінійної системи, що наведена на рисунку 1.3.

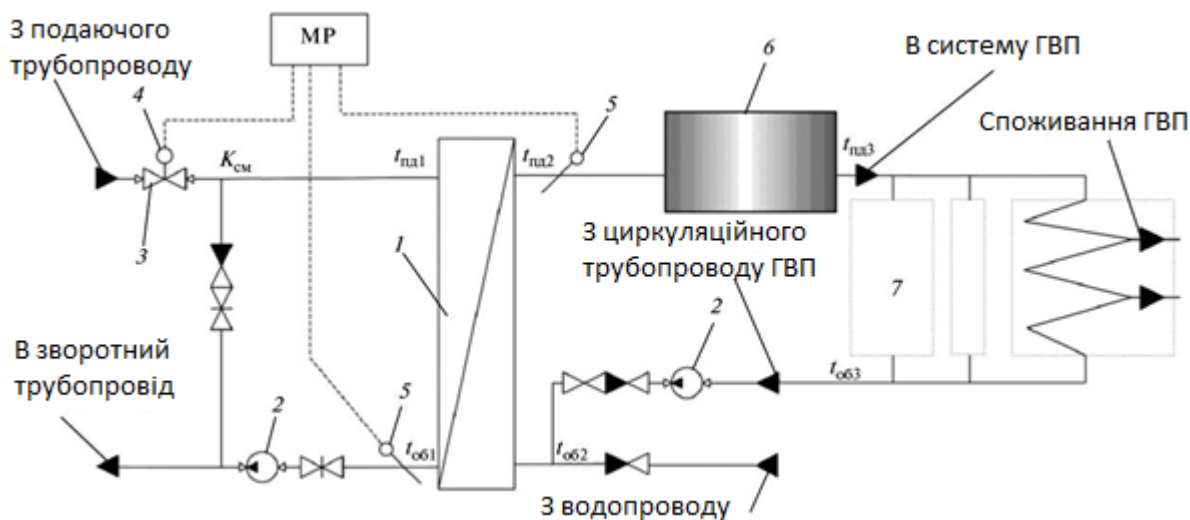


Рисунок 1.3 – Структура технологічної схеми теплообмінної системи:

1 – теплообмінник; 2 – насоси для циркуляції; 3 – клапан для регулювання;

4 – виконавчий механізм (ВМ);

5 – температурні датчики та мікропроцесорний регулятор;

6 – накопичувальний бак; 7 – стояк; ГВП – гаряче водопостачання

Відповідно до джерела [19] дана модель має нелінійні властивості. Ця нелінійність обумовлена такими факторами:

- наявністю електроприводу для регулюючого клапана 3;
- нелінійними властивостями змішування води в клапані [5];
- запізненням по каналах впливів керування;

– протікання води в трубопроводі вторинного контуру для двоконтурного котла.

Варто зазначити, що для двоконтурного піролізного котла на теплові процеси у первинному контурі (контурі опалення) істотно впливають хаотичні процеси у вторинному контурі (контурі водопостачання), який має велику кількість відгалужень стояків та їх різну віддаленість від теплообмінника.

Оскільки у високоефективних системах з теплообмінними апаратами запас нагрітої води є обмеженим, то при збільшенні або зменшенні її споживання важливим завданням є збільшення швидкодії системи керування. Іншим істотним фактором теплообмінній системі котла є необхідність періодичної подачі холодної води у вторинний контур для компенсації витрати теплоносія.

Неленійну математичну модель теплообмінної системи можна навести у просторі змінних станів так [18]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dK_{cm}(\tau)}{d\tau} = [k_{max} - K_{cm}(\tau)] \cdot \frac{k_h}{T_{np}} \cdot u(\tau); \\ \frac{dt_{nd1}(\tau)}{d\tau} = \frac{[t_1 - t_{ob1}(\tau)] \cdot K_{cm}(\tau) + t_{ob1}(\tau) - t_{nd1}(\tau)}{T_{cm}}; \\ \frac{dt_{nd2}(\tau)}{d\tau} = \frac{k_T \cdot t_{nd1}(\tau) + (1 - k_T)t_{ob2}(\tau) - t_{nd2}(\tau)}{T_T}; \\ \frac{dt_{ob1}(\tau)}{d\tau} = \frac{k_T \cdot t_{ob2}(\tau) + (1 - k_T)t_{nd1}(\tau) - t_{ob1}(\tau)}{T_T}; \\ \frac{dt_{nd3}(\tau)}{d\tau} = \frac{t_{nd2}(\tau) - t_{nd1}(\tau)}{T_{ok}}; \\ \frac{dt_{ob2}(\tau)}{d\tau} = \frac{(1 - k_{x.v.}) \cdot (1 - k_{ocm}) \cdot t_{nd3}(\tau) + (1 - k_{x.v.}) \cdot k_{ocm} \cdot t_{kom.} + k_{x.v.} \cdot t_{x.v.}(\tau) - t_{ob2}(\tau)}{T_{x.v.}}. \end{array} \right. \quad (1.3)$$

де τ – поточний час;

$u(t)$ – задаючий вплив електроприводного клапана;

K_{cm} – коефіцієнт змішування теплоносія;

k_{max} , k_h – коефіцієнти нелінійності залежності змішування;

k_T – коефіцієнт ефективності теплообмінника;

$k_{x.v.}$ – коефіцієнт впливу температури холодної води на температуру води у контурі опалення котла;

$k_{ост}$ – коефіцієнт охолодження теплоносія у контурі опалення котла;

$T_{пр}$ – час ходу приводу виконвчого механізму від 0% до 100%;

$T_{см}$ – стала часу зміщування електроприводного клапана;

T_T – стала часу в теплообміннику;

$T_{бк}$ – стала часу в баці;

$T_{хв}$ – стала часу у вузлі постачання холодної води;

T_1 – температура води магістральної мережі;

$t_{пд1}, t_{об1}$ – температура води на вході і зворотної води на виході зовнішнього контуру теплообмінної системи відповідно;

$t_{пд2}, t_{об2}$ – температура води на вході і зворотної води на виході внутрішнього контуру теплообмінної системи відповідно;

$t_{пд3}$ – температура води, що надходить з виходу проміжного зберігання;

$t_{ком}$ – температура довкілля;

$t_{x.v.}$ – температура холодної води, що надходить із системи водопостачання.

1.7. Спрощена модель теплообмінної системи

У роботі [18] для теплообмінної системи з піролізним котлом була запропонована спрощена неленійна математична модель у вигляді системи диференціальних рівнянь у Формі Коші (1.4).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dt_{nd1}(\tau)}{d\tau} = \frac{Q_p \cdot t_p + t_{ком} \cdot (1-Q) - t_{nd1}(\tau)}{T_{нагр}}; \\ \frac{dt_{nd2}(\tau)}{d\tau} = \frac{k_T \cdot t_{nd1}(\tau) + (1-k_T) \cdot t_{об2}(\tau) - t_{nd2}(\tau)}{T_T}; \\ \frac{dt_{об}(\tau)}{d\tau} = \frac{(1-k_{х.в.}) \cdot (1-k_{ост}) \cdot t_{nd3}(\tau) + (1-k_{х.в.}) \cdot k_{ост} \cdot t_{ком} + k_{х.в.} \cdot t_{х.в.}(\tau) - t_{об2}(\tau)}{T_{х.в.}}; \\ \frac{dt_{nd3}(\tau)}{d\tau} = \frac{t_{nd2}(\tau) - t_{nd3}(\tau)}{T_{бк}} \end{array} \right. \quad (1.4)$$

де τ – поточний час;

k_T – коефіцієнт ефективності теплообмінника;

$k_{х.в.}$ – коефіцієнт впливу температури холодної води на температуру води у контурі опалення котла;

$k_{ост}$ – коефіцієнт охолодження теплоносія у контурі опалення котла;

Q_p – відносний повітряний потік, що використовують для генерації піролізних газів в газогенеруючій камері;

$t_{т.в.}$ – теоретично максимально можлива температура води біля поверхні її нагрівання;

T_T – стала часу в теплообміннику;

$T_{бк}$ – стала часу в баці;

$T_{х.в.}$ – стала часу у вузлі постачання холодної води;

$t_{нд1}$ – температура води на вході до теплообмінної системи;

$t_{нд2}$, $t_{об2}$ – температура води на вході і зворотної води на виході внутрішнього контуру теплообмінної системи відповідно;

$t_{нд3}$ – температура води, що надходить з виходу проміжного зберігання;

$t_{ком}$ – температура доквілля;

$t_{х.в.}$ – температура холодної води, що надходить із системи водопостачання.

Саме спрощена математична модель буде використана для подальшого моделювання системи керування у програмному середовищі MatLab. Ця математична модель була побудована, виходячи із системи диференціальних рівнянь (1.3) теплообмінної системи.

Як стверджують у роботі [18], така спрощена математична модель є перевіреною і навіть декілька разів досліджувалася. Результати досліджень виявили, що модель поведінки температури, описана в (1.4), співпадає з тепловими процесами справжньої теплообмінної системи. В цій моделі більшість елементів була наведена звичайними інерційними ланками. Це дає підстави взяти систему диференціальних рівнянь (1.4) для моделювання теплових процесів піролізного котла з урахуванням адаптування прототипу теплообмінної системи.

При отриманні спрощеної моделі (1.4) були зроблені такі припущення [18]:

1) температуру подачі води піролізного котла T_{in} являє собою адитивну величину, яка залежить від повітряного потоку до камер котла (газогенераційної камери та камери згорання) і від температури повітря приміщення, що опалюється.

$$T_{in} = Q \cdot t_{m.с.} + t_{ком} \cdot (1 - Q), \quad (1.5)$$

де Q – сумарний повітряний потік, що використовують як для генерації піролізних газів в газогенеруючій камері Q_p , так і для спалювання піролізного газу в камері згорання Q_a . Оскільки повітряний потік Q_p впливає на кількість згенерованого піролізного газу в газогенеруючій камері, а від кількості газу в камері згорання залежить необхідний потік повітря до неї Q_a , то їх співвідношення регулюється так, щоб досягалася максимально можлива потужність котла. Така максимальна потужність котла досягається, якщо повітряний потік, спрямований до камери згорання в 10 разів більший за потік до газогенераційної камери, тобто $Q_a = 10 \times Q_p$. При такому співвідношенні повітряних потоків досягається оптимальне горіння. Якщо повітряний потік до

камери згорання менший за $10Q_p$, то частина піролізного газу залишиться не зпаленою, що призведе до утворення смоли та кіптяви в димарі. В протилежному випадку ($Q_a > 10 \times Q_p$) відбудеться втрата теплової енергії в довкілля разом із зайвим повітрям, що значно знижуватиме ККД піролізного котла;

$t_{т.в.}$ – теоретично максимально можлива температура води біля поверхні її нагрівання;

$t_{ком}$ – кімнатна температура (температура повітря приміщення, що опалюється).

Як стверджують у роботі [18], при моделюванні системи із припущенням (1.5) була отримана температура на виході опалювальної системи, яка може відповідати дійсності. Проте автори цієї роботи визнають, що експериментальних досліджень не проводили з міркувань безпеки, оскільки при нагріванні води до максимально можливої температури може вибухнути котел;

2) оскільки передача тепла в теплообміннику відбувається достатньо повільно, то в моделі можна не враховувати температуру зворотної води котла;

3) в другому рівнянні системи диференціальних рівнянь (1.3) можна знехтувати коефіцієнтом змішування, оскільки підмішування гарячої води в холодну у первинному контурі не відбувається;

4) замість температура води на вході до теплообмінної системи $t_{пд1}(\tau)$ можна узяти температуру подачі котла;

5) враховуючи вище наведені міркування, перше рівняння спрощеної математичної моделі (1.4) можна записати у вигляді:

$$\frac{dt_{пд1}(\tau)}{d\tau} = \frac{T_{in} - t_{пд1}(\tau)}{T_{нагр}}, \quad (1.6)$$

де $T_{нагр}$ – стала часу нагрівання піролізного котла;

Враховуючи наведені припущення, можна зробити висновок про недоцільність використання виконавчого механізму і клапана в первинному контурі котла.

Наявність лише одного стояка також спрощує систему диференціальних рівнянь.

Структура технологічної схеми спрощеної теплообмінної системи з піролізним котлом наведена на рисунку 1.4.

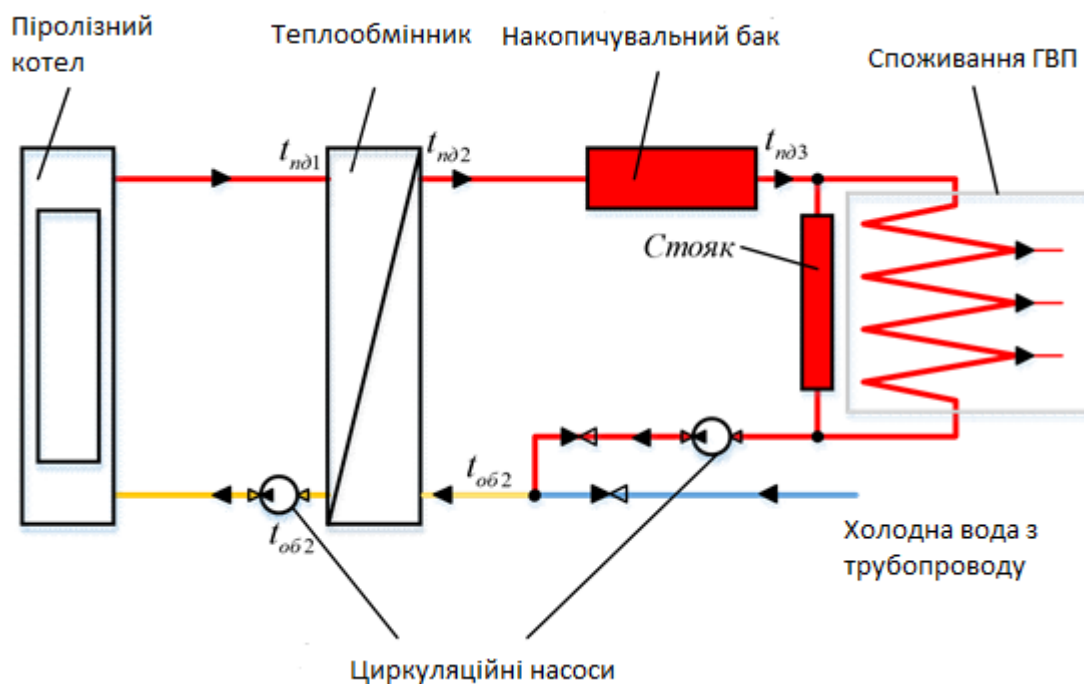


Рисунок 1.4 – Технологічна схема спрощеної теплообмінної системи з піролізним котлом [18]

Піролізний котел, наведений на рисунку 1.3, має водяну сорочку, в якій постійно циркулює вода. В камері згорання вода нагрівається і потрапляє в теплообмінник, в якому тепло нагрітої води передається в другий контур. Вода першого контуру охолоджується і повертається знову у піролізний котел. Оскільки теплообмінник є інерційним, то можна вважати, що температура подачі води приблизно дорівнює температурі зворотної води.

Вода з другого контуру потрапляє в накопичувальний бак. Накопичувальний бак виконує такі функції:

- підтримує тиск у системі при відключенні насосів;
- захищає систему від гідравлічного удару при перепаді напруги або при потраплянні в трубопровід повітря;

– зберігає певну кількість запасної води під тиском. Такий запас води дозволяє не вмикати насос при малому водоспоживанні. Зазвичай об'єму гарячої води, що знаходиться у накопичувальному баку, є достатньо для короткочасної її витрати. Отже насос працює з відпочинком, зменшує його знос.

Далі гаряча вода потрапляє в стояк. Спрощена модель узята для випадку, якщо в теплообмінній системі використовують лише один стояк. Зі стояка гаряча вода потрапляє до споживача. Якщо не відбувається споживання гарячої і холодної води з системи водопостачання, то циркуляційний насос циркулює воду через стояк. Для запобігання потрапляння холодної води до гарячої води і навпаки використовують прохідні клапани.

При витраті гарячої води, нагріта вода з теплообмінника потрапляє до системи постачання гарячої води (ГВП), що зменшує тиск в системі ГПВ. Під дією меншого тиску відкривається клапан холодної води, і холодна вода з системи водопостачання заповнює теплообмінник, в якому вона нагрівається і спрямовується до резервуару. З резервуару вода потрапляє до систем опалення та гарячого водопостачання.

2 МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛООБМІННОЇ СИСТЕМИ

2.1 Постановка задачі для дослідження системи керування піролізним котлом

Імітаційне моделювання теплообмінної системи на основі піролізного котла здійснювалося у середовищі MatLab Simulink. Вхідними даними для моделювання була взята спрощена математична модель (1.4), що складається з 4 диференціальних рівнянь, записаних в формі Коші. Завдяки цьому для їх реалізації в середовищі MatLab Simulink були використані прості арифметичні вирази Simulink. Отже, диференціальні рівняння теплообмінної системи, наведені в Simulink, являють собою прості аперіодичні ланки. Модель описувала температурні параметри води в будь-якій точці теплообмінної системи.

Для відтворення передатних функцій блоків системи керування піролізним котлом застосовані інтегруючі ланки Transfer Fcn; для виведення графіків у вигляді осцилограм – блок Scope; блок Constant – для задання початкових параметрів. Моделювання здійснювалось з розрахунку використання піролізного котла, потужністю 100 кВт, що використовується для опалення приміщення, площею 1000 м².

2.2 Імітаційне моделювання теплообмінних процесів

Перше рівняння системи (1.4) враховує теплові процеси, що відбуваються безпосередньо в піролізному котлі.

$$\frac{dt_{nd1}(\tau)}{d\tau} = \frac{Q_p \cdot t_p + t_{ком} \cdot (1 - Q) - t_{nd1}(\tau)}{T_{нагр}}, \quad (2.1)$$

де t_p – теоретично максимально можлива температура води біля поверхні її нагрівання. Вибираємо $t_p = 500^\circ\text{C}$;

$t_{ком}$ – температура доквілля. Приймаємо, що $t_{ком} = 25^\circ\text{C}$;

$T_{\text{нагр}}$ – стала часу нагрівання піролізного котла. Вибираємо $T_{\text{нагр}} = 300$ с.

Імітаційна модель піролізного котла, що відповідає диференціальному рівнянню (2.1) наведена на рисунку 2.1.

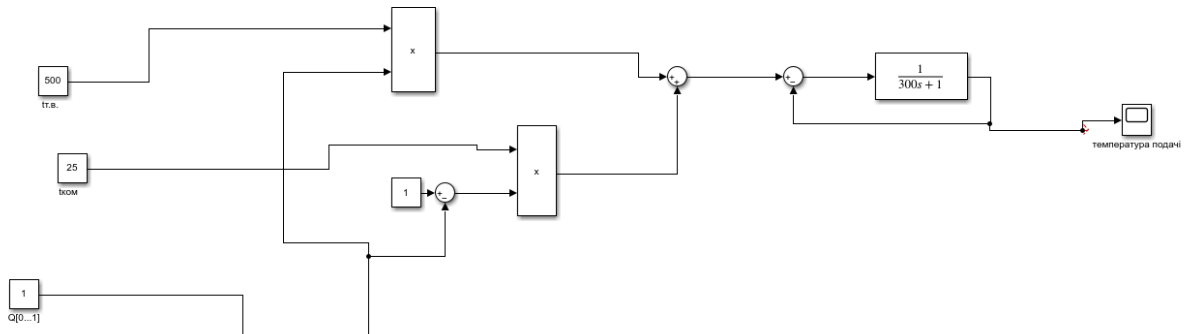


Рисунок 2.1 – Імітаційна модель піролізного котлу

Модель, наведену на рисунку 2.1, можна спростити до вигляду рисунка 2.2.

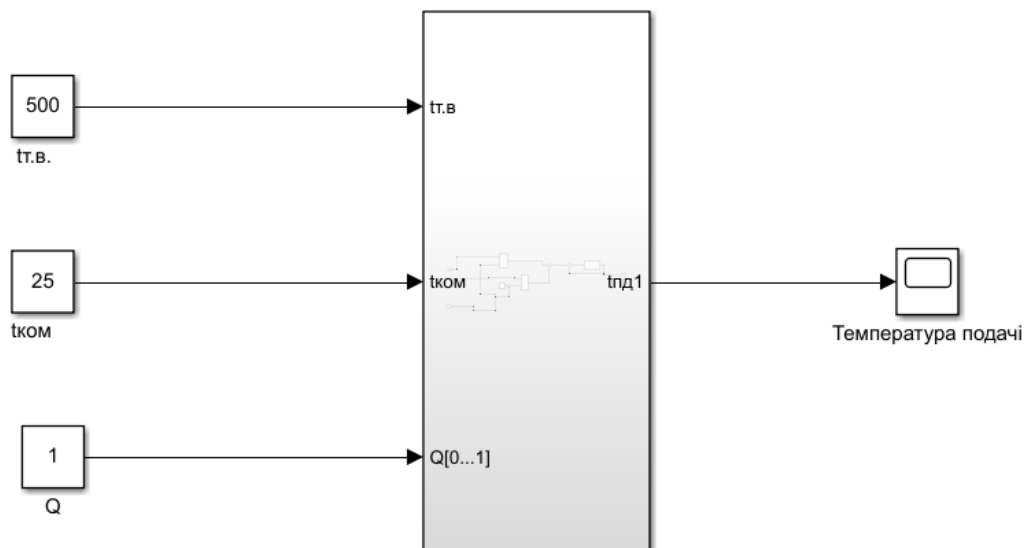


Рисунок 2.2 – Спрощена модель котла

Розробимо імітаційну модель для другого рівняння системи (1.4).

$$\frac{dt_{no2}(\tau)}{d\tau} = \frac{k_T \cdot t_{no1}(\tau) + (1 - k_T) \cdot t_{ob2}(\tau) - t_{no2}(\tau)}{T_T}, \quad (2.2)$$

де k_T – коефіцієнт ефективності теплообмінника. Для бюджетного варіанту вибираємо k_T 0,85;

T_T – стала часу у теплообміннику. Вибираємо $T_T = 210$ с.

Імітаційна модель теплообмінника, що відповідає диференціальному рівнянню (2.2) наведена на рисунку 2.3.

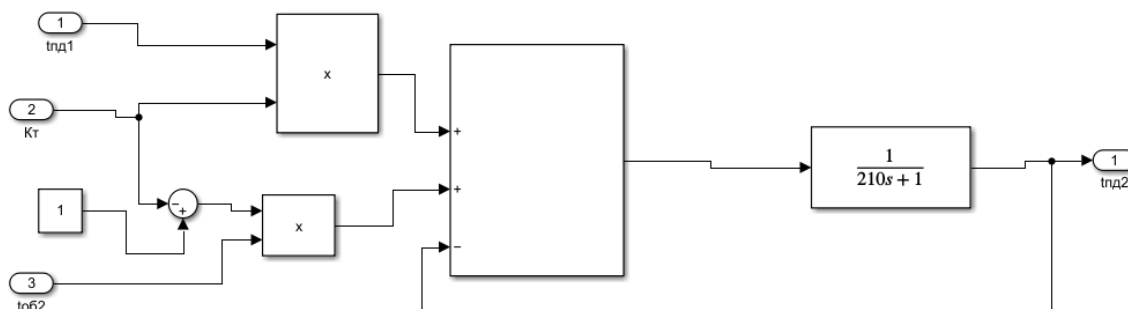


Рисунок 2.3 – Імітаційна модель теплообмінника

Модель, наведену на рисунку 2.3, можна спростити до вигляду рисунка 2.4.

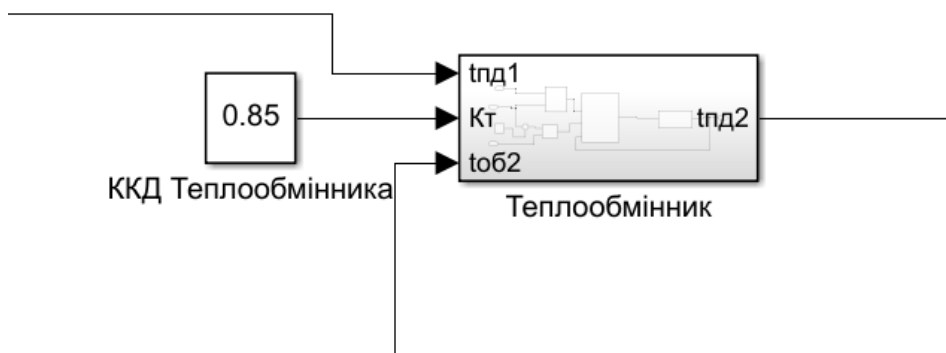


Рисунок 2.4 – Спрощена імітаційна модель теплообмінника

Модель, наведену на рисунку 2.5, можна спростити до вигляду рисунка 2.6.

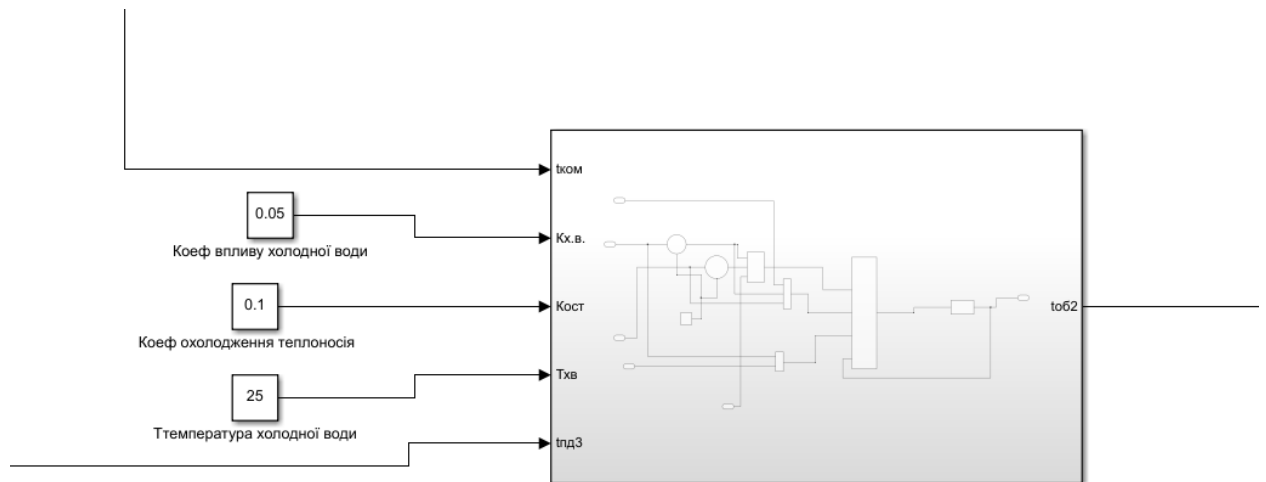


Рисунок 2.6 – Спрощена імітаційна модель системи опалення та гарячого водопостачання

Четверте диференціальне рівняння системи (1.4) описує теплообмінні процеси у накопичувальному баці.

$$\frac{dt_{нд3}(\tau)}{d\tau} = \frac{t_{нд2}(\tau) - t_{нд3}(\tau)}{T_{бк}}, \quad (2.4)$$

де $T_{бк}$ – стала часу в баці. Прийmemo $T_{бк} = 40$ с.

На виході передавальної функції необхідно додати суматор з температурою холодної води для того, щоб нагрівання холодної води не починалося від 0 °С, що не відповідає дійсності.

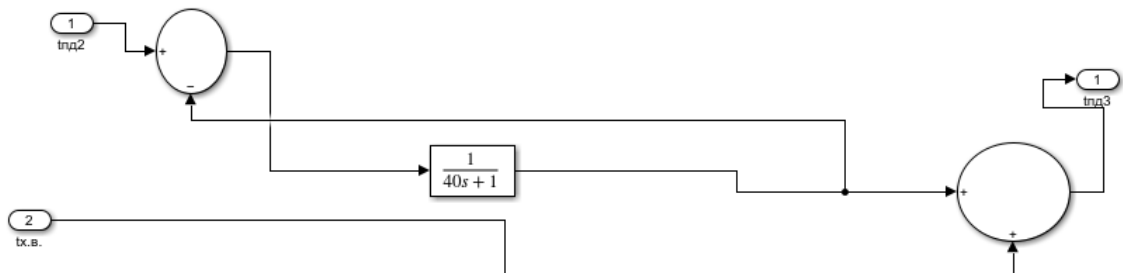


Рисунок 2.7 – Імітаційна модель накопичувального бака

Для створення загальної моделі системи теплообміну з піролізним котлом були з'єднані ланки передачі лініями зв'язку (рис. 2.8).

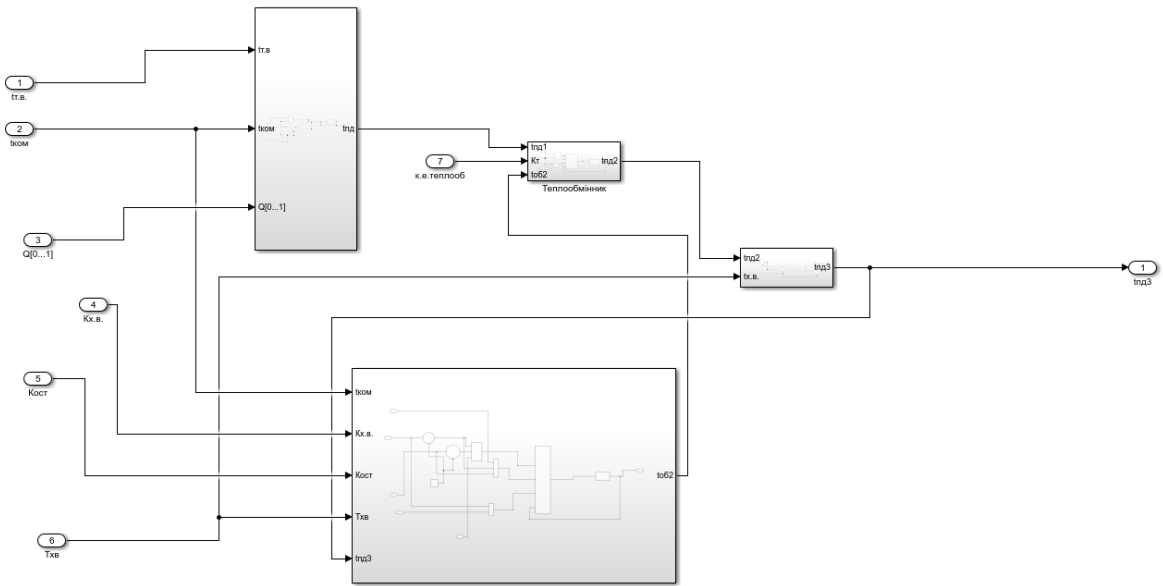


Рисунок 2.8 – Загальна модель теплообмінної системи

Для зручності і наочності наведення теплообмінної системи модель рисунка 2.8 за допомогою блоку підсистеми Subsystem була згорнута до рисунку 2.9.

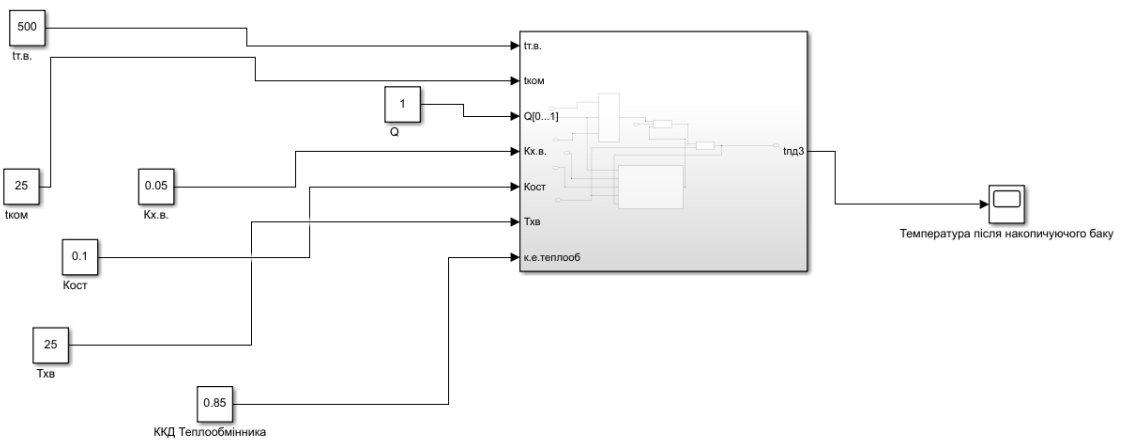


Рисунок 2.9 – Спрощена імітаційна модель теплообмінної системи

У цій моделі регулювання температури на виході з накопичувального бака та в будь-якій точці системи здійснюється за рахунок зміни відносного потоку повітря:

$$Q = Q_p + Q_a, \quad (2.5)$$

де Q_p – повітряний потік, що використовують для генерації піролізних газів в газогенеруючій камері;

Q_a – повітряний потік, що використовують для спалювання піролізного газу в камері згорання Q_a .

Найбільшої температури можна досягти, якщо $Q_a = 10 \times Q_p$. При відхиленні від цього співвідношення температура зменшується.

При синтезі регулятора АСУ і перевірці адекватності моделі контрольованим параметром є відносна подача повітря, неконтрольованими параметрами є різні коефіцієнти системи, такі як коефіцієнт впливу температури холодної води на температуру води у контурі опалення котла $k_{х.в.}$, який збільшується при споживанні гарячої води.

Для нагнітання повітряного потоку в піролізний котел використаний вентилятор, що складається з асинхронного електродвигуна з перетворювачем частоти, сталими яких можна знехтувати, оскільки тривалість перехідних процесів в них незрівнянно менша за тривалість перехідних теплообмінних процесів системи.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ТЕПЛООБМІННОЇ СИСТЕМИ З ПІРОЛІЗНИМ КОТЛОМ

3.1 Дослідження системи без регулятора температури

За допомогою середовища імітаційного моделювання MatLab Simulink досліджувався вплив таких параметрів як відносний потік повітря та витрата нагрітої води споживачем на температуру в баці. За рахунок зміни коефіцієнту впливу температури холодної води на температуру води у контурі опалення котла $k_{х.в}$ досліджувався її вплив на теплообмінну систему при досягненні сталої температури. Це завдання було виконано за допомогою функціонального блоку Step середовища MatLab Simulink. $k_{х.в}$ змінювали від 0,05 до 5.

На рисунку 3.1 наведені експериментально отримані характеристики зміни температури.

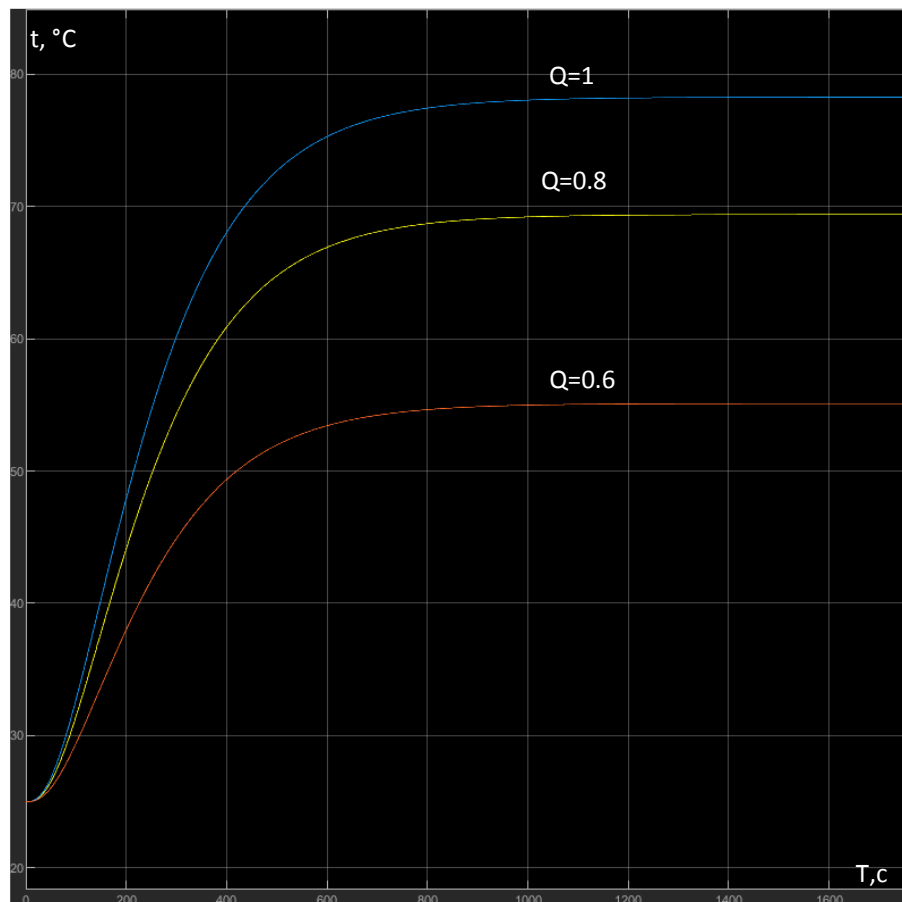


Рисунок 3.1 – Часова залежності температури нагрітої води при різних відносних повітряних потоків Q

Верхній графік ($Q=1$) відповідає оптимальному співвідношенню потоків $Q_a = 10 \times Q_p$. При відхиленні від цього співвідношення навіть на 20% ($Q=0,8$) температура зменшується від $78\text{ }^\circ\text{C}$ до $69\text{ }^\circ\text{C}$. Відхилення від оптимального співвідношення на 40% ($Q=0,6$) зменшує температуру нагрітої води на 30%. З графіків видно, що система є інерційною і характеризується значним запізненням, яке складає приблизно 20 хвилин. Отже, таку систему можна описати аперіодичною функцією другого порядку із запізненням.

Зменшувати співвідношення потоків Q нижче позначки 0,5 не рекомендують, оскільки при недостатній кількості повітря в камері згорання піролізний газ не буде повністю згорати і буде залишатися в котлі у вигляді сажі та смоли в димарі. Також з графіка рис. 3.10 видно, що при $Q=0,6$ вдалося нагріти воду до температури $55\text{ }^\circ\text{C}$. За вимогами до піролізних котлів температура зворотної води повинна бути не меншою за $50\text{ }^\circ\text{C}$ (див. п.1.5). Отже необхідно, щоб співвідношення потоків Q було не нижче 0,6 від номінального значення.

3.2 Дослідження системи з ПД - регулятором температури

Аналіз графіка 3.1 виявив, що перехідний процес триває 20 хвилин, що є занадто великим. Зменшити запізнення пропонується за рахунок використання ПД-регулятора. Для початку розрахуємо параметри ПД-регулятора. Спочатку спростимо математичну модель (1.4) теплообмінної системи до однієї передатної функції, використовуючи результати моделювання рис. 3.1. Для цього графічним методом (за кривою розгону рис. 3.1) визначимо передатну функцію теплообмінної системи та розрахуємо параметри ПД-регулятора.

В результаті аналізу графіка рис. 3.1 було визначено, що теплообмінну систему з піролізним котлом можна описати аперіодичною функцією другого порядку із запізненням, яка має s-подібну форму. Передатну функцію системи

можна навести у вигляді послідовно з'єднаних аперіодичної ланки та ланки із затримкою, тобто у вигляді

$$W_0(s) = \frac{k}{Ts+1} \cdot e^{-\tau s}, \quad (3.1)$$

де T – стала часу, k – передатний коефіцієнт, τ – запізнення.

Визначимо параметри такої функції. Для цього використаємо метод Зіглера Нікольса [20]. Визначати параметри передавальної функції будемо для випадку номінальній подачі повітря при $Q = 1$.

Графічне визначення параметрів спрощеної передавальної функції показано на рисунку 3.2.

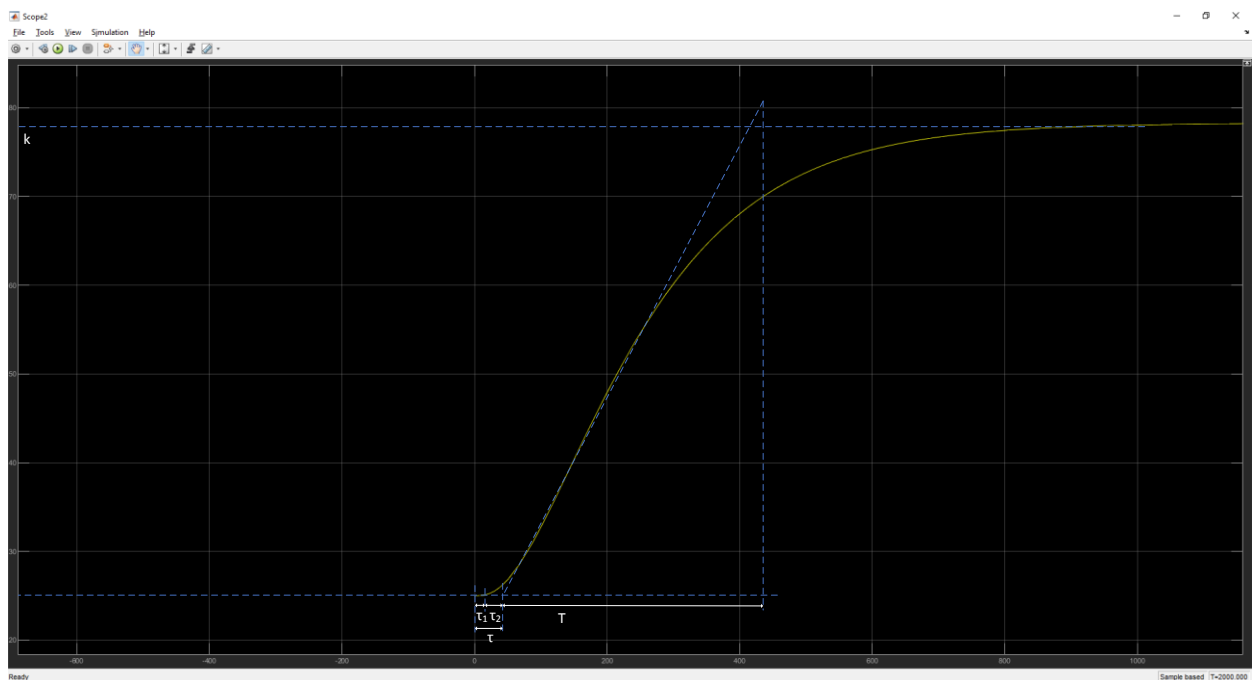


Рисунок 3.2 – Графічне визначення параметрів передавальної функції теплопередавальної системи

З графіку видно, що $k = 53 \text{ }^\circ\text{C}$, $T = 392 \text{ с}$, $\tau = 48 \text{ с}$, $\tau_1 = 16 \text{ с}$, $\tau_2 = 32 \text{ с}$.

Враховуючи, що на рис. 3.1 передатна функція системи має s -подібну форму, формулу (3.1) можна записати у такому вигляді:

$$W_0(s) = \frac{k \cdot e^{-\tau_1 s}}{(T_{0i} s + 1)^n}, \quad (3.2)$$

де T_{0i} – стала часу;

n – порядок моделі.

З графіку видно, що $k = 53$ °C, $T = 392$ с, $\tau = 48$ с, $\tau_1 = 16$ с, $\tau_2 = 32$ с, T_{0i} та n можна визначити за експериментальними параметрами T_0 і τ_2 , наведеними у таблиці 3.1

Таблиця 3.1 – Експериментально отримані параметри [18]

n	$\frac{\tau_2}{T_0}$	$\frac{T_0}{T_{0i}}$	$\frac{\tau_2}{T_{0i}}$	n	$\frac{\tau_2}{T_0}$	$\frac{T_0}{T_{0i}}$	$\frac{\tau_2}{T_{0i}}$
1	0,000	1,00	0,00	7	0,595	6,22	3,70
2	0,107	2,72	0,29	8	0,673	6,71	4,52
3	0,222	3,69	0,82	9	0,745	7,16	5,34
4	0,323	4,46	1,44	10	0,816	7,59	6,20
5	0,420	5,12	2,15	11	0,871	7,99	7,04
6	0,518	5,69	2,95	12	0,942	8,38	7,90

$$\frac{\tau_2}{T_0} = \frac{32}{392} = 0,0816.$$

Порівнюючи результати розрахунку та табличні дані можна прийти до висновку, що передатна функція має 2 порядок ($n=2$).

Розрахуємо сталу часу T_{0i} :

$$T_{0i} = \frac{T_0}{2,72} = \frac{392}{2,72} = 144,117;$$

$$T_{0i} = \frac{\tau_2}{0,29} = \frac{36}{0,29} = 110,344.$$

Визначимо середнє значення сталої часу:

$$T_{0i\text{cp}} = 127,231.$$

Підставимо визначені коефіцієнти до передатної функції (3.2):

$$W_0(s) = \frac{k \cdot e^{-\tau_1 s}}{(T_{0i} s + 1)^n} = \frac{53 \cdot e^{-16s}}{(127,231s + 1)^2}. \quad (3.3)$$

З урахуванням, того що для малих показників експоненти $e^{-s\tau_1} = 1 - s\tau_1 = 1 - 16 \cdot s$ вираз (3.3) набуде вигляду:

$$W_0(s) = \frac{53 \cdot e^{-16s}}{(127,231 + 1)^2} = \frac{53 \cdot (1 - 16 \cdot s)}{127,231^2 \cdot s^2 + 2 \cdot 127,231 \cdot s + 1}. \quad (3.4)$$

Використовуючи метод Зіглера Нікольса визначимо коефіцієнт пропорційності ПД-регулятора [21]:

$$k_p = \frac{0,74 \cdot T_0}{k_0 \cdot \tau} = \frac{0,74 \cdot 392}{53 \cdot 48} = 0,1158; \quad (3.5)$$

$$T_i = 0,74 \cdot T_0 = 0,74 \cdot 398 = 294,52;$$

$$T_d = \tau_1 \cdot T_0 = 0,16 \cdot 398 = 63,68.$$

Розраховані параметри підставляємо в імітаційну модель ПД-регулятора (рисунок 3.3).

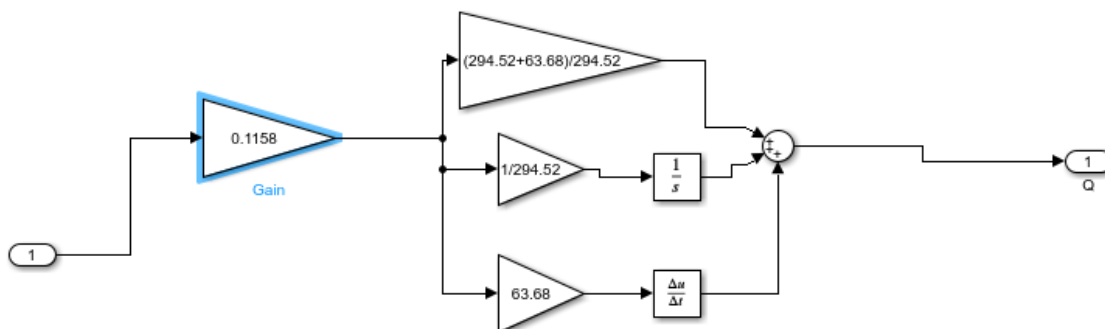


Рисунок 3.3 – Імітаційна модель ПД-регулятора

Відобразимо в MatLab Simulink розраховану модель теплообмінної системи з піролізним котлом (рисунок 3.4).

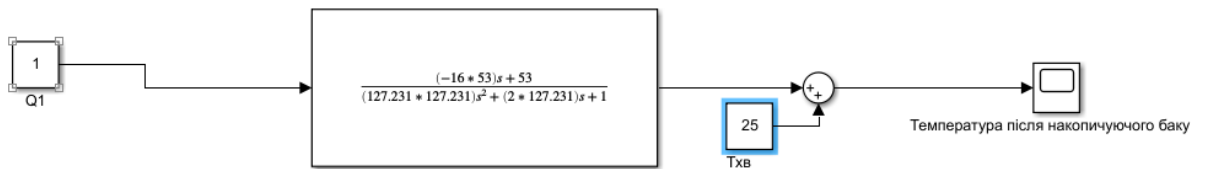


Рисунок 3.4 – Спрощена модель теплообмінної системи

Якщо порівняти передатні характеристики спрощеної моделі з використанням одного рівняння і повноцінної моделі з використанням чотирьох диференціальних рівнянь (рисунок 3.5), то можна побачити що графіки функцій обох моделей майже співпали. Це свідчить про адекватність спрощеної моделі по відношенню до повноцінної моделі.

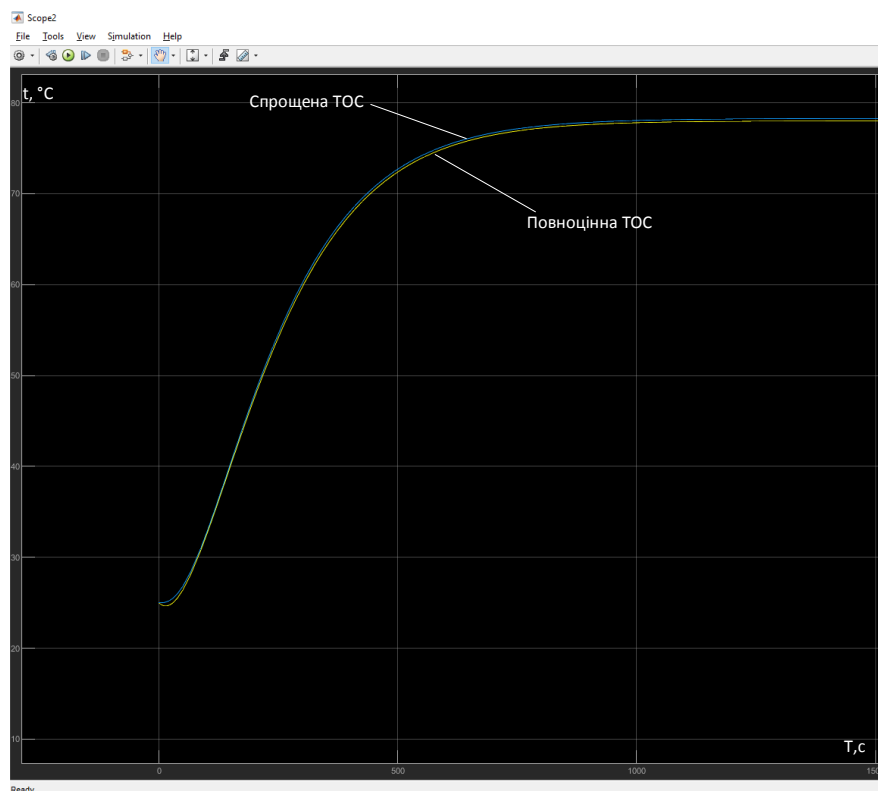


Рисунок 3.5 – Графік порівняння спрощеної та повноцінної передатних функцій

Додамо розрахований ПІД-регулятор (рис. 3.3) до системи спрощеної імітаційної моделі теплообмінної системи (рис. 2.9).

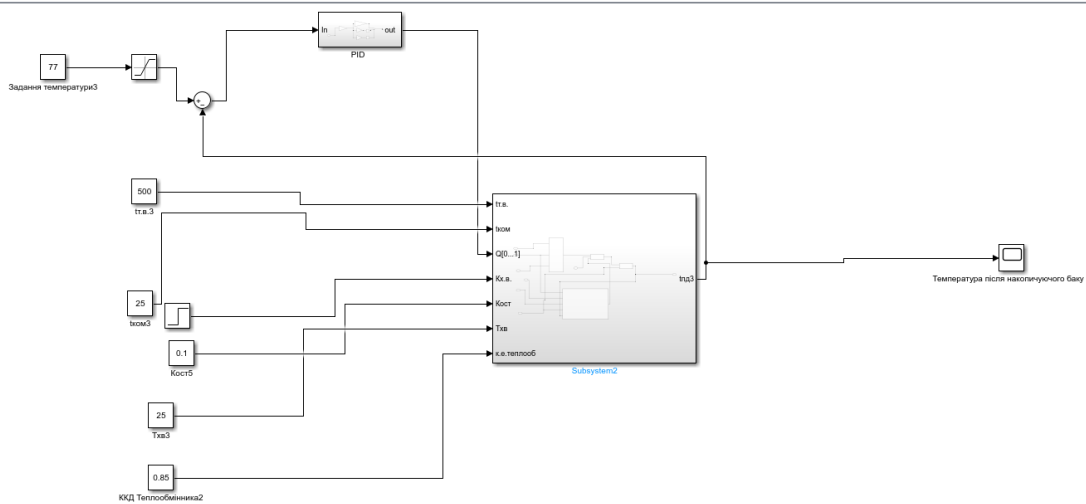


Рисунок 3.6 – Імітаційна модель піролізного котла з ПІД-регулятором

Промодельюємо теплообмінну систему з ПІД-регулятором при різних значеннях заданої температури (рис 3.7).

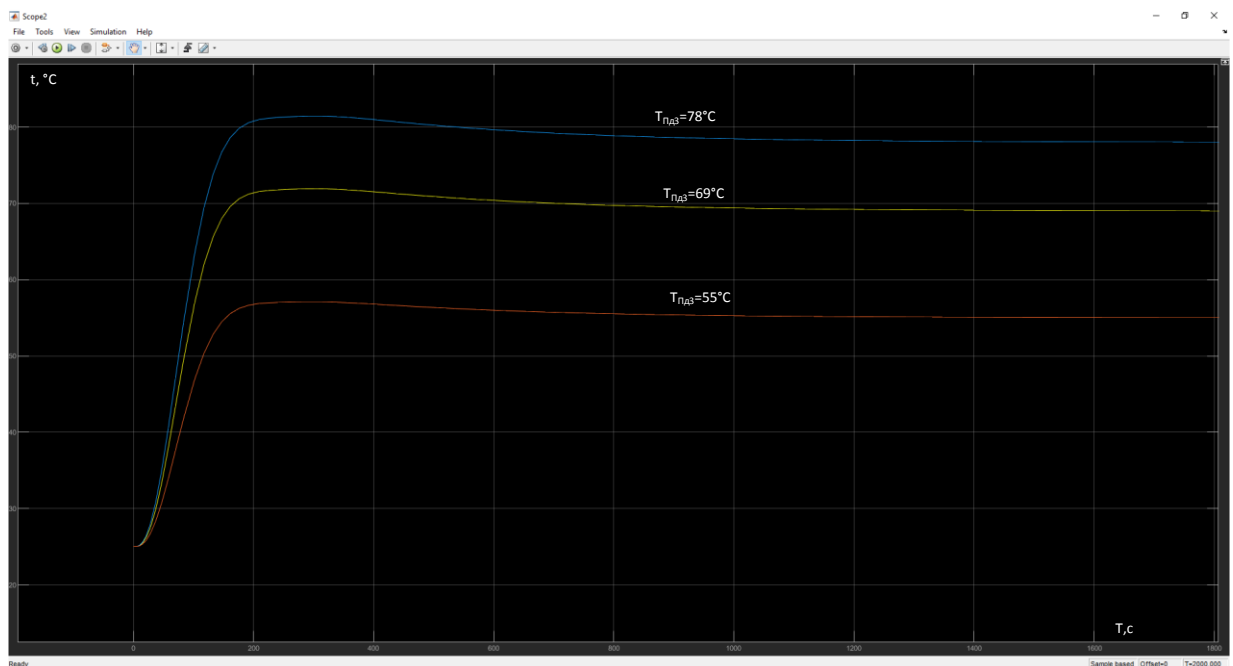


Рисунок 3.7 – Сімейство перехідних характеристики теплообмінної системи з ПІД-регулятором при різних значеннях заданої температури

З рисунку 3.7 видно, що температура задавалася в межах від 55 до 78 °С.

Порівняємо перехідні характеристики теплообмінної системи з ПІД-регулятором та без нього (рис. 3.8).

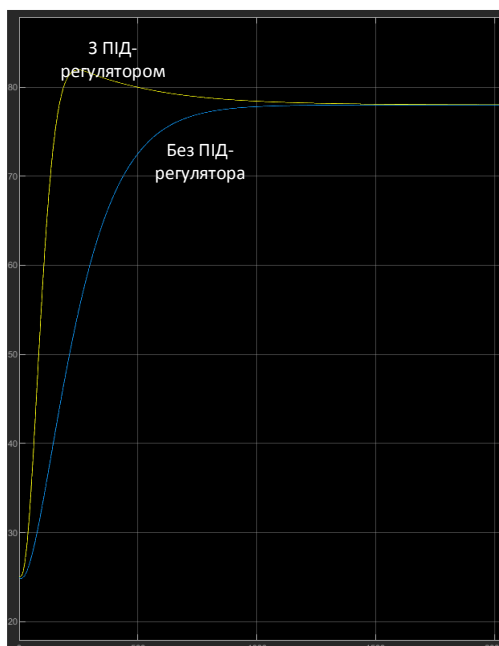


Рисунок 3.8 – Перехідні характеристики теплообмінної системи з ПІД-регулятором та без нього

З рисунку 3.8 видно, що тривалість перехідного процесу у випадку використання ПІД-регулятора зменшилася майже більше ніж в 6 разів і становить 3 хвилини порівняно з 20 хвилинами без ПІД-регулятора.

Визначимо перерегулювання σ ПІД-регулятора за перехідною характеристикою, наведеною на рисунку 3.9.

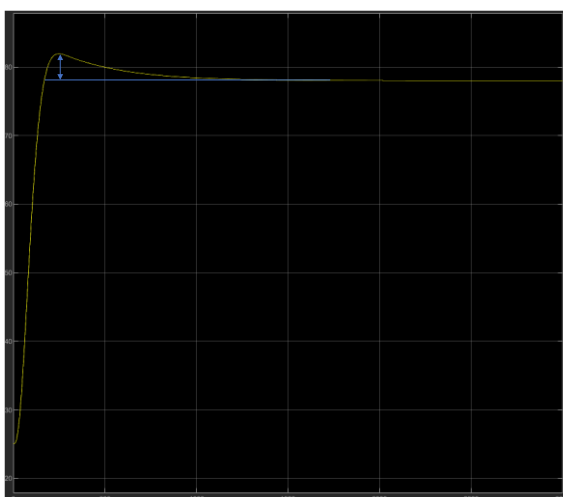


Рисунок 3.9 – Визначення перерегулювання ПІД-регулятора

$$\sigma = \frac{h_{\max} - h_{уст}}{h_{уст}} = \frac{82 - 78}{78} = 0,05128. \quad (3.6)$$

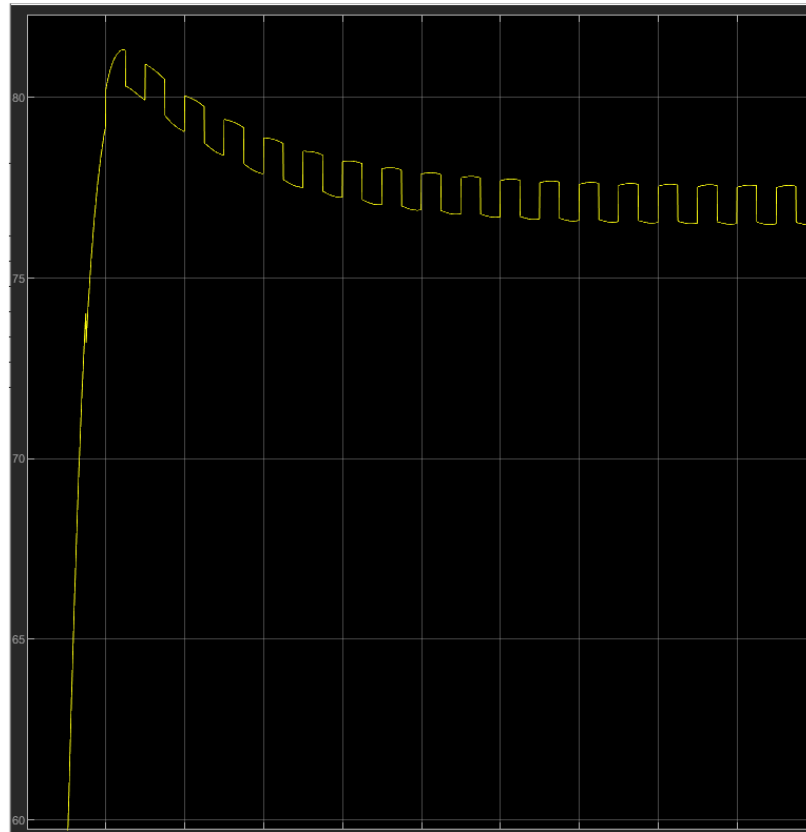


Рисунок 3.11 – Залежність температура води у баці від часу при змінній температурі холодної води теплообмінної системи з ПІД-регулятором

Як видно з графіка рис. 3.11, зміна температури холодної води, що надходить із системи водопостачання, на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ спричиняє коливання температури в баці (на виході теплопередавальної системи) на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Щоб зменшити динамічну помилку регулювання ПІД-регулятора було запропоновано додати блок адаптивної системи функцією якого буде зменшення динамічної помилки регулювання.

3.3 Дослідження адаптивної теплообмінної системи з піролізним котлом

Для реалізації адаптивної системи в середовище моделювання MatLab Simulink пропонується використати блок MRAC (Model reference adaptive controller), структура якого наведена на рисунку 3.12. Блок адаптації складається з еталонної моделі, механізму регулювання та контролера.

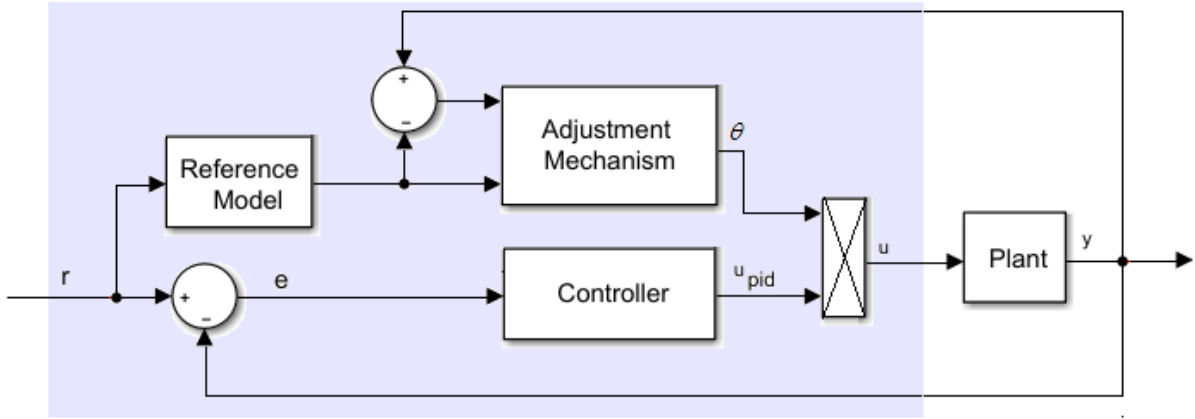


Рисунок 3.12 – Структура блоку адаптації MRAC в середовищі MatLab Simulink

Імітаційна модель адаптивної теплопередавальної системи з піролізним котлом наведена на рисунку 3.13.

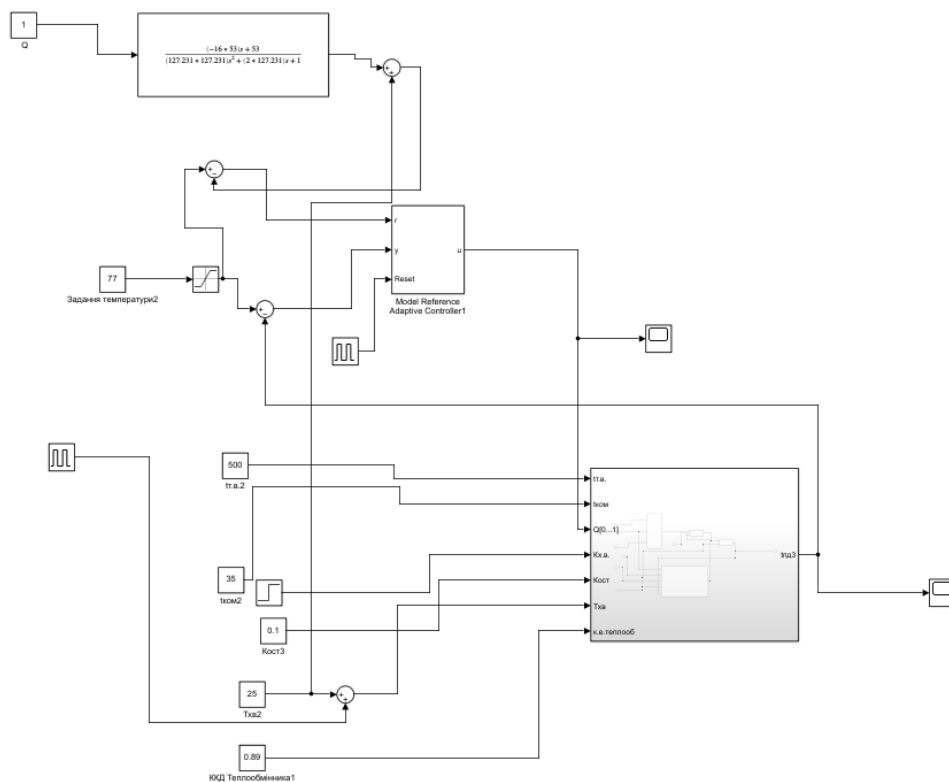


Рисунок 3.13 – Імітаційна модель адаптивної системи

Для адаптивної системи керування піролізним котлом була одержана залежність температури гарячої води у баці від часу при змінній температурі холодної води, що надходить із системи водопостачання (рис. 3.14).

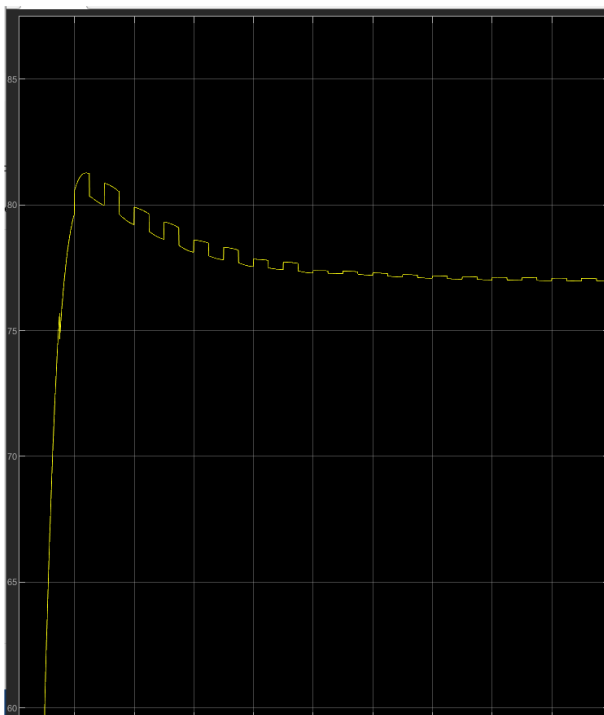


Рисунок 3.14 – Залежність температура води у баці від часу при змінній температурі холодної води теплообмінної системи з адаптивною системою

Як можна побачити з графіку рисунку 3.14, при зміні температури холодної води адаптивна система за час 16 хвилин наближає дану систему до еталонної моделі. Після 16 хвилин регулювання динамічна помилка не перевищує $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Зменшити час адаптації можна за рахунок збільшення кроку адаптації, але це призведе до збільшення динамічної помилки. Отже, задаючи крок адаптації можна впливати на час адаптації та на динамічну помилку регулювання у випадку коливань температури холодної води, що надходить із системи водопостачання.

4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ РОЗРАХУНКИ

Складемо таблицю кошторису проектованої системи.

Таблиця 4.1 – Кошторис витрат на закупівлю обладнання

Вид обладнання	Ціна одиниці, грн	Кількість одиниць, шт.	Сума покупки, грн.
Raspberry Pi Zero V1.	840	1	840
Карта пам'яті kingston 32gb micsdhc class 10	110	1	110
АЦП MCP3008	90	1	90
БЛОК ЖИВЛЕННЯ FANVIL 5V2A	160	1	160
АЦП MCP4725	245	1	245
ВСЬОГО			1445

Таблиця 4.2 – Кошторис витрат на проведення робіт

Вид робіт	Вартість грн/год	Кількість необхідних годин.	Всього, грн
Написання ПЗ	125	10	1250
Тестування	140	10	1400
Монтаж та підключення	65	5	325
Всього			2975

Сумарні витрати будуть складати $1445+2975=4120$ (грн)

Прибуток розрахуємо як вартість палива, яке вдалося зберегти при адаптивній системі. Оскільки, дана адаптивна система дозволяє отримати максимальний ККД, а без її система працює середньостатистичним ККД.

ККД середньостатистичного піролізного котла потужністю 100кВт становить 84-88%, і споживається при цьому до 40 кг/год палива. Вартість брикетів становить 85 грн за 10 кг. Тобто, 1 кг брикетів коштує 8,5 грн.

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T \cdot \eta;$$

З формули випливає $\frac{Q}{c \Delta T} = m \cdot \eta$.

$$\frac{Q_1}{c \Delta T} = \frac{Q_2}{c \Delta T}.$$

$$m_2 = \frac{\eta_1 \cdot m_1}{\eta_2} = \frac{0,86 \cdot 40}{0,88} = 39,09.$$

Отже, за 1 годину отримаємо економію в 900 г брикетів, що коштує 7,65 грн.

За 1 день отримаємо економію в $7,65 \cdot 24 = 183,6$ (грн).

Термін окупності = $4120 / 183,6 = 22,44$ (днів).

Тобто термін окупності даної системи становить 23 дні.

ВИСНОВКИ

1. В результаті літературних джерел була виявлена перспективність використання піролізних котлів, розглянута їх будова та принцип дії, проаналізовані технологічні параметри, що впливають на режими роботи та ефективність (ККД) піролізних котлів. Найбільше на ККД впливає співвідношення повітряних потоків до камери газогенерації та камери спалення.

2. Проаналізована математична модель теплообмінної системи з піролізним котлом, розглянута можливість її спрощення.

3. На основі математичної моделі теплообмінної системи була побудована імітаційна модель і запропонована її структурна схема.

4. Була промодельована теплообмінна система з ПІД – регулятором і без нього. Визначена ефективність ПІД – регулятора. У випадку використання ПІД – регулятора тривалість перехідного процесу зменшилась у 6 разів.

5. При змінних початкових умовах показана неефективність ПІД – регулятора та запропонована адаптивна система регулювання температурою гарячої води.

6. На основі аналізу витрат на реалізацію адаптивної системи та прибутку після впровадження визначений її термін окупності, що складає 23 дні.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Твердопаливний котел
https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B2%D0%B5%D1%80%D0%B4%D0%BE%D0%BF%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D0%BA%D0%BE%D1%82%D0%B5%D0%BB
2. Ващишак Ірина Романівна/ Мультипаливний котел на теплових трубках // Науковий вісник НЛТУ України . 2018. №1.
3. Канигін О.В. Підвищення ефективності газових жаротрубних водогрійних котлів Дисертація здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика, 144 – Теплоенергетика. - Київ – 2018, 246 с.
4. Olli Sippula, Kati Huttunen, Jouni Hokkinen, Sara Kärki, Heikki Suhonen, Tuula Kajolinna, Miika Kortelainen, Tommi Karhunen, Pasi Jalava, Oskari Uski, Pasi Yli-Pirilä, Maija-Riitta Hirvonen, Jorma Jokiniemi Emissions from a fast-pyrolysis bio-oil fired boiler: Comparison of health-related characteristics of emissions from bio-oil, fossil oil and wood // Elsevier Volume 248, May 2019, Pages 888-897
5. С. Ф. Кудашев, М. Н. Сарайкин АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ВИДОВ ПИРОЛИЗНЫХ КОТЛОВ
6. О. В. Шаповал, Н. В. Чепурна, М. А. Кириченко Аналіз ефективності роботи повітряного теплового насоса залежно від коливань температури зовнішнього повітря // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. Вип. 37, 2021. – С. 24-30.
7. К. В. Юхимчук, В. В. Петрусь Порівняльний аналіз використання теплових насосів та газових котлів для теплопостачання багатоповерхового житлового будинку 2019 р.
<https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/25029/52975.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

8. Bezrodnyi M., Lysenko T., Oslovskyy S. Thermodynamic efficiency of heat pump heating and ventilation scheme using the heat of ground and ventilation emissions // Science and Technology of the XXI Century : the XIX All-Ukrainian Students R&D Conference Proceeding, (Kyiv, November 29, 2018) / National Technical University of Ukraine „Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute“. – Part I. – Kyiv, 2018. – P. 122.
9. Галянчук І. Р. Моделювання конвективних теплопередавальних систем парових котлів ТЕС – Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук за спец. «05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика», Львів – 2020 р. – 20 с.
10. Пыльнев В. Г., Звегинцева А. М., Назаренко М. О. Построение математической модели системы автоматического регулирования пиролизного котла // WORLD SCIENCE: PROBLEMS AND INNOVATIONS: сборник статей XXXIII Международной научно-практической конференции – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2019. – С. 104-110.
11. Redfern, Kyle D., "Utilization of pyrolysis oil in industrial scale boilers" (2013). Graduate Theses and Dissertations. 13067. <https://lib.dr.iastate.edu/etd/13067>
12. ГАЗОГЕНЕРАТОР. ПИРОЛИЗНЫЕ КОТЛЫ. // Газогенератор URL: <http://gazogenerator.com/oborudovanie/gazogenerator-piroliznye-kotly/> (дата звернення: 22.11.2021).
13. Elie Tawil P. E. Boiler Classification and Application <https://www.cedengineering.com/userfiles/Boiler%20Classification%20and%20Application.pdf>
14. Принцип работы пиролизного твердотопливного котла длительного горения // Гидпроект URL: <http://gidproekt.com/princip-raboty-piroliznogotverdotoplivnogo-kotla-dlitelnogo-goreniya.html> (дата звернення: 22.11.2021).

15. Твердотопливные котлы длительного горения — полная классификация и советы по выбору модели // StoryAqua URL: http://stroyaqua.com/vodosnab_otopl/kotel/tverdotoplivnye-kotly-dlitelnogo-goreniya.html (дата звернення: 22.11.2021).
16. BOILERS <https://www.beeindia.gov.in/sites/default/files/2Ch2.pdf>
17. Расчет мощности и расхода дров // Самогрейка URL: <http://samogreyka.ru/raschet-moshhnosti.html> (дата звернення: 22.11.2021).
18. ШИЛИН, А.А. УПРОЩЕНИЕ МОДЕЛИ СЛОЖНОЙ ТЕПЛООБМЕННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РЕЛЕЙНОГО УПРАВЛЕНИЯ [Электронный ресурс] / А.А. ШИЛИН, В.Г. БУКРЕЕВ. — Электрон. журн. — Москва: МАИК "Наука/Интерпериодика", 2014.
19. Шилин А.А., Букреев В.Г., Койков К.И. Математическая модель нелинейной системы с запаздыванием // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2013. № 6. С. 3–10
20. Ziegler J.G., Nichols N.B. Optimum settings for automatic controllers // Trans. ASME. 1942. Vol. 64. P. 7599768.
- 21.. Лукас В.А. Теория автоматического управления. – М.: Недра, 1990.

