

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

МАКСИМЕНКО АНДРІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 681.516.77

ДИСЕРТАЦІЯ

**КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ
ПРОЛІЗОМ ВІДХОДАМИ АГРОТЕХНОЛОГІЙ З ВИЗНАЧЕННЯМ
СКЛАДУ СИНТЕЗ-ГАЗУ**

Спеціальність 151 – автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Галузь знань: 15 – автоматизація та приладобудування

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

 А.О. Максименко

Науковий керівник – Брунеткін О. І., доктор технічних наук, доцент,
професор кафедри комп'ютерних технологій автоматизації

Одеса – 2021

АНОТАЦІЯ

Максименко А. О. Комп'ютерно-інтегрована система управління піролізом відходами агротехнологій з визначенням складу синтез-газу. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології. – Державний університет «Одеська політехніка» МОН України, Одеса, 2021.

Дисертаційна робота присвячена удосконаленню методів і моделей комп'ютерно-інтегрованого керування піролізною установкою, яка використовує відновлювальні джерела енергії – відходи агропромислового комплексу, а саме соломі, за рахунок визначення складу соломи, що проходить процес піролізу в реальному часі.

У першому розділі «Розгляд стану автоматизованого керування піролізними установками» проведено:

- аналіз поточного стану агропромислового комплексу України, об'єму і енергетичного потенціалу відходів агротехнологій, порівняння різних способів енергетичної конверсії біомаси, наведені типові технологічні схеми піролізу рослинної біомаси, визначено основні способи керування процесом піролізу відходів агротехнологій, визначено подальший напрям досліджень. Визначено, що потенціал відходів агротехнологій в Україні – значний. Визначено напрями поточних досліджень при використанні комп'ютерно-інтегрованих систем керування для піролізу відходів агротехнологій, виявлено недоліки в існуючих підходах вирішення задачі автоматизованого керування, такі як нехтування інформацією про склад речовини, яка є сировиною для піролізу.

- обґрунтування структури і формулювання завдання дисертаційного дослідження, яке полягає у розробці методів і моделей комп'ютерно-інтегрованого управління піролізною установкою, що використовує відходи агротехнологій, а саме соломі, з стабілізацією теплотворної здатності утвореного синтез-газу. Стабілізація теплотворної здатності утвореного синтез-газу в умовах збурень хімічного складу

соломи виконується за рахунок визначення зміну складу сировини, що проходить процес піролізу в реальному часі, обчислення і застосування відповідного компенсуючого впливу до піролізної установки.

- класифікацію культури, з якої походять відходи агропромислового походження умовною брутто-формулою, що уможливило виконання подальших обчислень з метою визначення найкращих для досягнення найвищої теплотворної здатності утвореного синтез-газу технологічних параметрів, насамперед температури. Класифікація умовною брутто-формулою була виконана шляхом розрахунку кількості вуглецю, кисню й водню заснованому на відомих формулах целюлози та інших добре вивчених складових рослинних культур.

У другому розділі «Побудова моделі піролізної установки як об'єкта керування» одержано такі результати:

- метод моделювання процесу піролізу та перетворення відходів агротехнологій в синтез-газ, модельним уявленням умовною брутто-формулою. Цей метод використовує закони хімічної кінетики, збереження речовини і балансу максимальних валентностей окислювальних і відновних елементів, що дало змогу розрахувати граничну теплотворну здатність сумішей органічних речовин;

- модель управління, яку засновано на пропорційному законі керування, яка дозволяє оцінити вплив регульованих параметрів на цільову величину – теплотворну здатність утвореного синтез-газу.

- модель нечіткої кластеризації та класифікації, засновану на використанні відомих методів і методик нечіткої кластеризації та класифікації, аналізі статистичних даних про чисельність і брутто-формули культур відходів агротехнологічного виробництва, яка дозволила обирати найкращі, для забезпечення найвищої теплотворної здатності утвореного синтез-газу технологічні параметри, у вигляді завдань для регуляторів.

- імітаційну модель процесу піролізу відходами агротехнологій як об'єкта керування у вигляді матриці передавальних функцій;

- модель процесу піролізу біомаси агротехнологічного походження, яка заснована на використанні законів хімічної кінетики, збереження речовини і балансу

максимальних валентностей окислювальних та відновних елементів, що була доповнена визначенням кількості вуглецевого залишку, що сумісно з подальше розвиненою моделлю класифікації дозволило визначити склад сировини;

- виявлено вплив збурення складу речовини, що проходить процес піролізу на властивості об'єкта управління.

В третьому розділі «Синтез системи керування піролізною установкою» виконано наступне:

- визначено найкращий метод вирішення задачі керування з урахуванням особливостей об'єкта керування, таких, як нелінійність теплотворної здатності утвореного синтез-газу і температури в установці, неточність і неповнота інформації, а саме – нечіткого контролера на системі нечіткого вводу-виводу Мамдані.

- розроблено загальну структуру системи керування, що включає в себе піролізну установку, ізоентальпійний пристрій що використовується сумісно з екстремальним регулятором температури і обчислювальним пристроєм для визначення складу речовини, що проходить процес піролізу, видає завдання температури для регулятора, обчислює поточний показник коефіцієнту надлишку окиснювача;

- розроблено систему мутацій функцій приналежності, нечіткого регулятора, що забезпечує сталість якості керування за критеріями часу регулювання і помилки керування.

- виконано перевірку стійкості отриманої системи за критерієм умови Найквіста.

- виконано моделювання реакції теплотворної здатності утвореного синтез-газу на збурення стрибком складу відходів агропромислових технологій (брутто-формули соломи)

В четвертому розділі «Синтез комп'ютерно-інтегрованої системи управління піролізом відходів агротехнологій з визначенням складу синтез-газу» досягнуто мету дисертаційної роботи, а саме:

- розроблено метод визначення складу речовини, що проходить процес піролізу за рахунок вирішення задачі, оберненої до моделювання процесу піролізу з

використанням інформації про вуглецевий залишок, та утворений синтез-газ, і за допомогою допоміжного ізоентальпійного пристрою;

- визначено середнє і максимальне відхилення теплотворної здатності утвореного синтез газу за умов збурення складу соломи, що проходить процес піролізу

- встановлено, що на визначених межах збурення складу соломи, що проходить процес піролізу, середнє відхилення теплотворної здатності не перевищує 1.5%, а максимальне – 5 %, що задовольняє умові поставленій задачі

Ключові слова: АСУ, джерела відновлювальної енергії; ідентифікація віходів агротехнологій, синтез-газ, КІСУ, нечітка логіка, піроліз.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано основні результати дисертаційного дослідження:

1. O. Brunetkin, M. V. Maksymov, A. Maksymenko, M.M. Maksymov (2019) *Development of the unified model for identification of composition of products from incineration, gasification, and slow pyrolysis, Восточно-Европейский журнал передовых технологий, №4(6). С. 25-31(SCOPUS)*
2. O. Brunetkin, Y. Dobrynin, A. Maksymenko, O. Maksymova, S. Alyokhina. *Model and method of conditional formula determination of oxygen-containing hydrocarbon fuel in combustion* (2020) *Energetika. №6/8 (1). P. 77–84(SCOPUS)*
3. O. Brunetkin, Y. Dobrynin, A. Maksymenko, O. Maksymova, S. Alyokhina. *Inverse Problem Of The Composition Determination Of Combustion Products For Gaseous Hydrocarbon Fuel. (2020) Computational Thermal Sciences: An International Journal. P.477-489 (SCOPUS)*
4. A. Maksymenko. *Development of Control System for Waste Pyrolysis Unit of Agricultural Complex With the Application of Fuzzy Logic* (2021) *Technology Audit and Production Reserves, 4(2), P. 60.*
5. M. Maksymov O. Brunetkin, A Maksymenko, O. Lysyuk. *Mathematical model*

of determination of composition of mixture of hydrocarbonic acid-containing gases of combused fuel. (2019) *Вчені записки Таврійського університету імені В.І. Вернадського*. Серія: Технічні науки, 29 (68), С 77–84.

6. А. Максименко. Побудова на нечіткій логіці комп'ютерної системи автоматичного управління об'єктом, що має обмежені обчислювальні й енергетичні ресурси. (2016) *Наукові праці Чорноморського державного університету імені Петра Могили комплексу Києво-Могилянська академія*. Серія: Комп'ютерні технології, 287(285) С. 83-88.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

7. А. Максименко. Класифікація видів сільськогосподарських культур за умовною формулою для процесу піролізу. (2021) *Science, Theory and Practice Abstracts of International Scientific and Practical Conference*, Tokyo, Japan 2021 С.446-448

8. А. Maksymenko. Model of control for pyrolysis reactor for agricultural waste based on proportional control law. (2021) *Міжнародна науково-практична конференція «Наука, освіта, інновації та технології: стан, проблеми та перспективи розвитку»*. Збірник тез доповідей (Полтава 2021)

9. А. Maksymenko. Model of straw composition fuzzy clusterization and classification for selection of best technological parameters for pyrolysis. (2021) *Science, Theory and Practice. Abstracts of International Scientific and Practical Conference*, Tokyo, Japan 2021

10. А. Maksymenko. Method of approximate analytical solution of nonstationary heat transfer problem through heat exchange surface. (2021) *Modern science: innovations and prospects. Proceedings of International scientific and practical conference. SSPG Publish*. Stockholm, Sweden. 2021. P. 21-27

ABSTRACT

Maksymenko A. Computer-integrated agrotechnology waste pyrolysis control system with gas synthesis composition identification. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 151 - automation and

computer-integrated technologies. - Odesa Polytechnic State University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Odesa, 2021.

The dissertation is dedicated to the improvement of methods and models of computer-integrated control of pyrolysis plant, which uses renewable energy sources - waste from the agro-industrial complex, straw in particular - by determining the composition of straw undergoing pyrolysis in real time.

In the first section "Consideration of the state of automated control of pyrolysis plants" were conducted:

analysis of the current state of the agro-industrial complex of Ukraine, volume and energy potential of agricultural waste, comparison of different methods of energy conversion of biomass, typical technological schemes of biomass pyrolysis plant, the main methods to control the pyrolysis process of agricultural waste, further research direction identified. It is determined that the potential of agricultural waste in Ukraine is significant. The directions of current research in the use of computer-integrated control systems for pyrolysis of agricultural waste has been analyzed, shortcomings in existing approaches to solving the problem of automated control has been identified - such as neglect of information about the composition of the substance that is a raw material for pyrolysis.

substantiation of the structure and formulation of the dissertation research task, which consists in the development of methods and models of computer-integrated control of pyrolysis plant that utilizes waste of agricultural technologies - straw in particular, with stabilization of calorific value of gas synthesis. Stabilization of the calorific value of the formed synthesis gas in the conditions of perturbations of the chemical composition of straw is performed by determining the change in the composition of raw materials undergoing pyrolysis in real time, calculating and applying the appropriate compensating effect to the pyrolysis plant.

classification of the crop from which the waste of agro-industrial origin originates by the conditional brutto formula, which allowed further calculations to determine the best technological parameters to achieve the highest calorific value of the formed synthesis gas, especially temperature. Classification by conditional brutto formula was performed by calculating the amount of carbon, oxygen and hydrogen based on known formulas of

cellulose and other well-studied components of crops.

The following results are obtained in the second section "Designing a model of a pyrolysis plant as a control object":

method of modeling the process of pyrolysis and conversion of agricultural waste into synthesis gas, model representation of the conditional brutto formula. This method uses the laws of chemical kinetics, conservation of matter and the balance of maximum valences of oxidizing and reducing elements, which allowed to calculate the maximum calorific value of mixtures of organic substances;

control model, which is based on the proportional control law, which allows to assess the impact of adjustable parameters on the target value - the calorific value of the formed synthesis gas.

fuzzy clustering and classification model based on the use of known methods and techniques of fuzzy clustering and classification, analysis of statistical data on the number and gross formula of crops of agro-technological waste, which allowed to choose the best to ensure the highest calorific value of synthesis gas in the form of tasks for regulators.

simulation model of the process of pyrolysis of agricultural waste as an object of management in the form of a matrix of transfer functions;

model of the pyrolysis process of biomass of agro-technological origin, which is based on the use of the laws of chemical kinetics, conservation and balance of maximum valences of oxidizing and reducing elements, which was supplemented by determining the amount of carbon residue.;

the influence of perturbation of the composition of the substance undergoing the pyrolysis process on the properties of the object of control is revealed.

In the third section "Synthesis of the pyrolysis control system" the following is performed:

the best method of solving the control problem is determined taking into account the features of the control object, such as nonlinearity of calorific value of the formed synthesis gas and installation temperature, inaccuracy and incomplete information, namely fuzzy controller on Mamdani fuzzy I/O system;

developed a general structure of the control system, which includes a pyrolysis unit,

isoenthalpy device used in conjunction with an extreme temperature controller and a computing device to determine the composition of the substance undergoing pyrolysis, gives a temperature task for the controller.

developed a system of mutations of membership functions, fuzzy controller, which ensures consistency of control quality according to the criteria of control time and control error.

the stability of the obtained system was checked according to the Nyquist condition criterion.

modeling of the reaction of calorific value of the formed synthesis gas to the perturbation of the aggregate waste of agro-industrial technologies (gross straw formula)

In the fourth section "Synthesis of computer-integrated pyrolysis management system of agricultural waste with determination of the composition of synthesis gas" the purpose of the dissertation is achieved, namely:

developed a method for determining the composition of the substance undergoing the pyrolysis process by solving the problem of modeling the pyrolysis process using information about the carbon residue, and the formed synthesis gas, and using an auxiliary isoenthalpy device;

determined the average and maximum deviation of the calorific value of the formed synthesis gas under conditions of perturbation of the straw composition, which undergoes the process of pyrolysis

established that at certain limits of perturbation of straw composition undergoing pyrolysis process, the average deviation of calorific value does not exceed 1.5%, and the maximum - 5%, which satisfies the condition of the task.

Keywords: ACS, renewable energy sources; identification of agrotechnology waste, synthesis-gas, CISC, fuzzy logic, pyrolysis.

LIST OF PUBLICATIONS

Scientific works in which the main results of the dissertation research are published:

1. O. Brunetkin, M. V. Maksymov, A. Maksymenko, M.M Maksymov Development of the unified model for identification of composition of products from incineration, gasification, and slow pyrolysis. (2019) *Eastern-european journal of advanced technologies*, №4(6). C. 25-31(SCOPUS)
2. O. Brunetkin, Y. Dobrynin, A. Maksymenko, O. Maksymova, S. Alyokhina. Model and method of conditional formula determination of oxygen-containing hydrocarbon fuel in combustion.(2020) *Energetika*. №6/8 (1). P. 77–84(SCOPUS)
3. O. Brunetkin, Y. Dobrynin, A. Maksymenko, O. Maksymova, S. Alyokhina. Inverse Problem Of The Composition Determination Of Combustion Products For Gaseous Hydrocarbon Fuel. (2020) *Computational Thermal Sciences: An International Journal*. P.477-489 (SCOPUS)
4. A. Maksymenko. Development of Control System for Waste Pyrolysis Unit of Agricultural Complex With the Application of Fuzzy Logic. (2020) *Technology Audit and Production Reserves*, 4(2), P. 60.
5. M. Maksymov O. Brunetkin, A Maksymenko, O. Lysyuk. Mathematical model of determination of composition of mixture of hydrocarbonic acid-containing gases of combused fuel. (2019) *Scientific notes of Tavriya University named after V.I. Vernadsky*. Series: Technical Sciences, 29 (68), P 77–84.
6. A. Maksymenko. Building on the fuzzy logic of a computer system for automatic control of an object that has limited computing and energy resources. (2016) *Scientific works of the Petro Mohyla Black Sea State University of the Kyivo-Mohylanska Academy complex*. Series: Computer Technology, 287(285) P. 83-88.

Published approbation works:

7. A. Maksymenko. Classification of crop species according to the conditional formula for the pyrolysis process. (2021) *Science, Theory and Practice Abstracts of International Scientific and Practical Conference*, Tokyo, Japan 2021 C.446-448
8. A. Maksymenko. Model of control for pyrolysis reactor for agricultural waste based

on proportional control law. (2021) *International scientific-practical conference «Science, education, innovation and technology: state, problems and prospects of development »*. Collection of abstracts, Poltava 2021

9. A. Maksymenko. Model of straw composition fuzzy clusterization and classification for selection of best technological parameters for pyrolysis. (2021) *Science, Theory and Practice. Abstracts of International Scientific and Practical Conference*, Tokyo, Japan 2021

10. A. Maksymenko. Method of approximate analytical solution of nonstationary heat transfer problem through heat exchange surface. (2021) *Modern science: innovations and prospects. Proceedings of International scientific and practical conference. SSPG Publish*. Stockholm, Sweden. 2021. P. 21-27

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	14
ВСТУП.....	15
Розділ 1 РОЗГЛЯД СТАНУ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ	
ПРОЛІЗНИМИ УСТАНОВКАМИ.....	20
1.1 Оцінка енергетичного потенціалу рослинної біомаси в Україні.....	20
1.2 Енергетичне застосування соломи.....	27
1.3 Моделі управління	33
1.4 Моделі технологічного процесу піролізу.....	37
1.5 Постановка задачі дослідження	40
1.6 Висновки до першого розділу	42
Розділ 2. ПОБУДОВА МОДЕЛІ ПРОЛІЗНОЇ УСТАНОВКИ ЯК ОБ'ЄКТА	
КЕРУВАННЯ	43
2.1 Постановка задачі управління.....	43
2.2 Модель нечіткої кластеризації та класифікації видів соломи	47
2.3 Розробка моделі процесу піролізу відходів агротехнологій	49
2.4 Модель піролізного реактора як об'єкта управління	57
2.5 Вплив змін складу відходів агротехнологій на динамічні характеристики	
об'єкта управління	69
2.6 Висновки до другого розділу.....	70
Розділ 3. СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЛІЗНИМ РЕАКТОРОМ ..	71
3.1 Визначення методів вирішення задачі керування.	71
3.2. Загальна структура інтегрованої системи керування.....	74
3.3 Окремі вузли системи керування.	76
3.4 Нечіткий регулятор температури, витрати повітря і витрати біомаси	87
3.5 Екстремальний регулятор температури в тестовому реакторі	79

3.6 Модифікація функцій приналежності нечіткого регулятора.....	80
3.7 Дослідження стійкості петлі управління нечіткий регулятор-піролізна установка	81
3.8 Моделювання	84
3.9 Висновки до третього розділу.....	84
Розділ 4. СИНТЕЗ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ	
УПРАВЛІННЯ ПІРОЛІЗОМ ВІДХОДІВ АГРОТЕХНОЛОГІЙ	
3 ВИЗНАЧЕННЯМ СКЛАДУ СИНТЕЗ-ГАЗУ	85
4.1. Завдання проектування комп'ютеризованої системи.....	85
4.2 Модель і метод визначення складу відходів агропромисловості	88
4.3 Апаратна складова.....	90
4.4 Програмні складові методів обробки інформації і керування КІСУ	98
4.5 Висновок до четвертого розділу	113
ВИСНОВКИ.....	114
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	116
ДОДАТОК А.....	127
ДОДАТОК Б.....	130
ДОДАТОК В1.....	134
ДОДАТОК В3.....	136
ДОДАТОК В2.....	138
ДОДАТОК В4.....	140

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АСУ – автоматична система управління

АЦП – аналогово цифрове перетворення

АФЧХ – амплітудно-фазово-частотна характеристика

КІСК – комп’ютерно-інтегрована система керування

НДР – науково-дослідна робота

НЛ – нечітка логіка

ПДЕ – поновлювані джерела енергії

ПГУ – парогазова установка

ПІ – пропорційно-інтегральний

ПД – пропорційно диференціальний

ПІД -пропорційно-інтегрально-диференціальний

САК – система автоматичного керування

СЕС – сонячна електрична станція

ТЕС – теплова електрична станція

ЦП – центральний процесор

ШНМ – штучна нейронна мережа

ВСТУП

Актуальність теми. В сучасному світі помітний тренд на зростання ролі енергетики заснованій на відновлюваних джерелах, насамперед – на використанні відходів агропромислового комплексу [11], [12]. Україна має значний агропромисловий комплекс, відходи якого слабо використовуються в енергетиці. У той самий час, Україна має обширну енергоінфраструктуру, що споживає значну кількість вуглеводневих палив. Одна з ключових проблем, що стоїть на заваді використанню відходів агротехнологій в якості джерела вуглеводневих палив – притаманна змінна якість продуктів переробки відходів агротехнологій на паливні матеріали, як наприклад – синтез-газу. Це ускладнює включення синтез-газу в існуючу енергоінфраструктуру, оскільки для безаварійної роботи теплових електростанцій необхідний стабільний склад палива.

Виникає технічне протиріччя – між змінним складом продуктів переробки біомаси рослинного походження попереднє визначення складу якої надзвичайно складне, і необхідністю підтримки сталого значення теплотворної здатності отриманого синтез-газу для потреб енергетичного сектору.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана відповідно до Державної цільової програми розвитку аграрного сектору економіки на період до 2022 року, затвердженою розпорядженням Кабінету Міністрів України від 30 грудня 2015 р. № 1437-р, і є частиною заходів зі сприяння створенню нових потужностей з виробництва та глибокої переробки сільськогосподарської продукції та модернізації існуючих, зокрема у сфері виробництва органічної продукції, садівництва, тваринництва, виноградарства, продукції дитячого харчування тощо.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є вдосконалення методів і моделей комп'ютерно-інтегрованої системи управління піролізною установкою, яка використовує відходи агротехнологій для додаткового вироблення енергоресурсу за рахунок визначення складу синтез-газу в реальному часі, з подальшим використанням цієї інформації в контурах управління. Для досягнення мети, необхідно:

- провести аналіз стану автоматизованого керування піролізними установками

для утилізації відходів агротехнологій, та класифікувати їх умовною брутто-формулою;

- розробити модель керування, кластеризації та класифікації, процесу піролізу біомаси агротехнологічного походження як складову моделі комп'ютерно-інтегрованої системи керування процесом піролізу відходів агротехнологій на базі визначення складу синтез-газу для розв'язання задачі керування в комп'ютерно-інтегрованій системі управління;

- розробити метод керування піролізною установкою, що забезпечує високий рівень робастності, для розв'язання задачі керування установкою піролізу відходів агротехнологій, який забезпечує високе значення теплотворної здатності отриманого продукту за умов змін складу сировини;

- розробити метод визначення складу відходів агротехнологій в реальному часі.

Об'єкт дослідження – комп'ютерно-інтегрована система керування енергетичною установкою, що використовує відходи агротехнологій для збільшення енергоресурсу.

Методи дослідження – математичний аналіз допоміг визначити властивості аналізованих функцій; імітаційне моделювання підтвердило одержані теоретичні результати; методи системного аналізу використані для декомпозиції технологічного процесу; моделювання нестационарних процесів піролізу, заснованих на законах збереження речовини, Дальтона, хімічної рівноваги за парціальними тисками, засноване на рішенні системи нелінійних алгебраїчних рівнянь, дало змогу врахувати вплив збурення за складом соломи, продукт-газу і вуглистого залишку; методи чисельного моделювання зміни властивостей об'єкта керування дозволили визначити вид технологічної схеми процесу піролізу соломи; комп'ютерні інформаційні та програмні технології для реалізації розробленого алгоритму керування;

Наукова новизна одержаних результатів:

Вперше запропоновано метод класифікації відходів агротехнологій, а саме соломи, умовною брутто-формулою, яка була виконана шляхом розрахунку складових частин вуглецю, кисню й водню, заснованому на представленні целюлози

та інших рослинних культур у вигляді брутто-формули, що дозволило при моделюванні сировини, яка перетворюється в процесі піролізу визначити найкращі технологічні параметри для процесу.

Вперше розроблено інтегровану модель керування, класифікації та кластеризації, процесу піролізу відходів агротехнологічного походження, яка складається з моделювання: процесу керування заснованому на пропорційному законі; класифікації та кластеризації відходів агропромислового комплексу (соломи), заснована на класифікації культури соломи умовною брутто-формулою, статистичних і пробабілістичних значеннях наявності певних видів культур, і використанні нечітких множин; піролізу відходів агротехнологічного походження, яка заснована на використанні законів хімічної кінетики, збереження речовини і балансу максимальних валентностей окислювальних та відновних елементів, така інтегрована модель дозволила визначити найкращий регульований параметр у вигляді температури для отримання найвищої теплотворної здатності синтез газу, і розробити метод комп'ютерно-інтегрованого керування піролізною установкою.

Знайшов подальший розвиток метод комп'ютерно-інтегрованого керування заснований на нечіткій логіці, інтегрованій моделі керування, класифікації та кластеризації, та піролізу відходів агропромислового комплексу, що полягає в мутаціях функцій приналежності вхідних і вихідних змінних системи нечіткого вводу-виводу Мамдані, який відрізняється від існуючих застосуванням співвідношень, що відображають інформацію про зміну властивостей відходів агропромисловості в зоні реакції піролізної установки, що дозволило отримати високе значення робастності системи управління, і стабілізувати значення теплотворної здатності синтез-газу.

Знайшов подальшого розвитку метод визначення складу відходів агротехнологій, заснований на моделі, яка заснована на використанні законів хімічної кінетики, збереження речовини і балансу максимальних валентностей окислювальних та відновних елементів, яку було доповнено визначенням кількості вуглецевого залишку, що дозволило визначати склад речовини, що проходить процес піролізу в реальному часі, і використати інформацію про склад речовини в

інтегрованій моделі керування, класифікації та кластеризації, піролізу відходів агротехнологічного походження, що дозволило вирішити задачу керування, а саме стабілізації значення теплотворної здатності утвореного синтез-газу

Практичне значення одержаних результатів.

Розроблені моделі і методи автоматизованого керування установки піролізу соломи. Запропонована технологічна схема дозволяє використовувати солому для отримання синтез-газу з високою і стабільною теплотворною здатністю.

Результати роботи впроваджено в ТОВ «Аграрний інститут». Модельні зразки САК пройшли випробування в ТОВ «Украгро» та впроваджені в навчальний процес Державного Університету «Одеська політехніка» кафедри комп'ютерних технологій автоматизації в дисциплінах «Моделювання теплоенергетичного обладнання в АСУ», «Динаміка теплових процесів», «Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів», «Структурна та параметрична оптимізація»

Особистий внесок здобувача. Наукові результати, викладені в дисертації, одержані автором самостійно. Автору належать основні ідеї у розробці методів і моделей комп'ютерно-інтегрованого керування установкою піролізу, що використовує солому для отримання синтез-газу високої і стабільної теплотворної здатності.

У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належить:

в [1] – метод визначення кількості вуглицевого залишку, що уможливило визначення складу відходів агротехнологій, які проходять процес піролізу за умови відомостей про склад синтез газу.;

в [2] – метод ідентифікації складу відходів агротехнологій за умови наявності інформації про кількість вуглицевого залишку, і складу утвореного синтез-газу;

в [3, 5] – метод визначення складу відходів агротехнологій в реальному часі, що дозволило розробити систему автоматизованого керування, яка компенсує зміни складу відходів агротехнологій.

Публікації. Результати наукових досягнень викладені в 10 друкованих працях, з них з 6 – у спеціалізованих наукових виданнях (3 публікації – у міжнародній науково-метричній базі SCOPUS).

Апробація результатів роботи. Результати дисертаційного дослідження доповідалися, обговорювалися і отримали схвалення на міжнародних науково-практичних конференціях і семінарах: «Science, Theory and practice: International Scientific and Practical Conference» (м. Токіо, 2020); Міжнародна науково-практична конференція «Наука, освіта, інновації та технології: стан, проблеми та перспективи розвитку» (Полтава 2020), «Science, Educational problems and Prospects: International Scientific and Practical Conference» (м. Токіо, 2020)

Структура та об'єм роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел з 86 найменуваннями. Загальний обсяг дисертації становить 141 сторінок (з них 113 – основного тексту), 6 рисунків, 18 таблиць.

РОЗДІЛ 1. РОЗГЛЯД СТАНУ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ПІРОЛІЗНИМИ УСТАНОВКАМИ

У цьому розділі проведено аналіз поточного стану агропромислового комплексу України, об'єму і енергетичного потенціалу відходів агротехнологій, порівняння різних способів енергетичної конверсії біомаси, наведені типові технологічні схеми піролізу рослинної біомаси, визначено основні способи керування процесом піролізу відходів агротехнологій, визначено подальший напрям досліджень.

У першому розділі вирішені такі завдання:

- оцінка енергетичного потенціалу відходів агротехнологій;
- визначення умовних бруutto-формул типових для України культур.;
- порівняння різних способів енергетичної конверсії рослинної біомаси;
- порівняння різних способів технологічної організації, і керування процесом піролізу.

1.1 Оцінка енергетичного потенціалу рослинної біомаси в Україні.

В сучасному світі енергетика набула надзвичайно великого значення, як побутові домогосподарства так і об'єкти критичної інфраструктури залежать від безперебійного теплопостачання енергоносіїв певних видів. Зокрема, значна кількість ТЕЦ в Україні використовує газ як сировину [11]. З іншого боку, поставки значної кількості газу фізично залежать від країни, що в даний момент і в найближчому майбутньому є геополітичним супротивником України. Цей факт, а також слабка розвиненість інфраструктури альтернативних електростанцій, таких як вітрові та сонячні робить дослідження альтернативних видів енергоносіїв вкрай важливими.

За даними держстату [12] в 2020 році Україна виробила більше 70 млн. тон агропродукції, що вказує на велику перспективу використання відходів агропромисловості як джерела альтернативних електроносіїв.

В роботі [13] наведено статистичну модель оцінки кількості і енергетичної

цінності(в сенсі питомої теплоти згорання) соломи та інших решток отриманих з залишків зібраного врожаю певних видів культур, а саме – пшениці, озимої пшениці, ярової пшениці, проса, жита, вівса, кукурудзи, гречки, роху, соняшнику, сої, рису, ріпаку. Модель має вигляд рівнянь:

Для пшениці:

$$\begin{aligned}x &= 1.8y_1 + 3.8; \quad y_1 \in [10 \dots 25] \\x &= y_1 + 25; \quad y_1 \in [26 \dots 40]\end{aligned}\tag{1.1}$$

Для жита:

$$\begin{aligned}x &= 1.7y_2 + 3.4; \quad y_2 \in [10 \dots 25] \\x &= 0.8y_2 + 25.9; \quad y_2 \in [26 \dots 40]\end{aligned}\tag{1.2}$$

Для ячменю:

$$\begin{aligned}x &= 1.3y_3 + 4.2; \quad y_3 \in [10 \dots 20] \\x &= 0.5y_3 + 19.8; \quad y_3 \in [21 \dots 35]\end{aligned}\tag{1.3}$$

Для овсу:

$$\begin{aligned}x &= 0.9y_4 + 6.5; \quad y_4 \in [10 \dots 20] \\x &= 0.9y_4 + 7.2 \quad y_4 \in [21 \dots 35]\end{aligned}\tag{1.4}$$

Для проса:

$$\begin{aligned}x &= 0.7y_5 + 16.2; \quad y_5 \in [2 \dots 20] \\x &= 2y_5 + 7.1; \quad y_5 \in [21 \dots 30]\end{aligned}\tag{1.5}$$

Для кукурудзи:

$$x = 1.2y_6 + 17.5; \quad y_6 \in [10 \dots 35]\tag{1.6}$$

Для гороху:

$$\begin{aligned}x &= 1.3y_7 + 4.5; \quad y_7 \in [5 \dots 21] \\x &= 1.2y_7 + 3; \quad y_7 \in [22 \dots 30]\end{aligned}\tag{1.7}$$

Для гречки:

$$\begin{aligned}x &= 1.7y_8 + 4.7; \quad y_8 \in [5 \dots 15] \\x &= 1.3y_8 + 10.3; \quad y_8 \in [16 \dots 30]\end{aligned}\tag{1.8}$$

Для соняшнику:

$$x = 1.8y_9 + 5.3; \quad y_9 \in [8 \dots 30]\tag{1.9}$$

Де $y_1 \dots y_9$ – урожайність пшениці, жита, ячменню, овса, проса, кукурудзи, горохи, гречки та соняшнику відповідно в центнерах за гектар, а x – умовна урожайність соломи в центнерах за гектар.

Модель наведена в роботі [13] заснована на даних урожайності за роки з 1990-по 2011. Її важливою перевагою є те, що в її основі лежить взаємозв'язок урожайності культур, та кількості утвореної соломи, тому вона не є чутливою до таких факторів як кліматичні зміни, метеорологічні коливання, зміна складу та методів застосування добрив, зміна якості ґрунтів, а отже є придатною для оцінки кількості утвореної соломи в обраний період за 2015-2020 роки. Дана модель, що складається з рівнянь 1.1-1.9 являє собою набір рівнянь регресії, тому з метою не допущення появи визначених похибок в оцінках, обчислення в подальшій роботі будуть виконуватися лише в межах вказаних областей визначення $y_1 \dots y_9$.

Для оцінки кількості утвореної соломи з використанням рівнянь 1.1 – 1.19 необхідно зібрати дані про урожайність та засіяну площу за рік, підставити дані про урожайність, в відповідні рівняння, отриману умовну урожайність соломи помножити на площу засіяних полів. Тобто:

$$N_i = f_i(y_i) * S_i \quad (1.10),$$

Де N_i – маса соломи певної культури в тисячах центнерів - f_i – відповідне цій культурі рівняння з набору рівнянь 1.1 – 1.9, S_i – площа засіяних культур цієї культури в тисячі гектарів.

В таблиці 1.1 наведено дані про урожайність (ц/га) таких культур як пшениця, жито, ячмінь, овес, просо, кукурудза, горох, гречка, соняшник за 2015-2020 роки.

Таблиця 1.1

Урожайність(ц/га) полів в засіяних відповідними культурами в 2015-2020 роках

Культура/рік	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Пшениця	39,4	41,35	49,74	36,94	40,56	36,5
Кукурудза	49,57	64	37,925	63,33	53,8	53,12
Ячмінь	30,98	33,53	45,9	30,94	42,08	33,03
Жито	27,05	29,52	29,35	29,6	30,175	32,76

Продовження табл. 1.1

Овес	24,025	25,18333	24,6	23,225	24,8	23,92
Гречка	11,4	12	10,4	13,367	12,775	12,4
Просо	21,325	18,04	16,15	13,65	19,225	17,16667
Горох	22,22	28,05	37,46	18,68	22,96	20,78
Соняшник	23,4	21,3	18,95	22,43333	24,26667	19,25

В таблиці 1.2 Наведено дані про площу(тис.га) засіяних полів вище наведених культур.

Таблиця 1.2

Зібрана площа по видах культур за 2015-2020 роки

Культура/рік	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Пшениця	25773,3	23836,2	19213,4	25601	27167,5	25023,9
Кукурудза	3871	8936,2	3048,6	4685,9	1463,6	4787,8
Ячмінь	11108,6	11407,1	8456,9	9783,2	10721,6	9165,2
Жито	524,1	522,5	468,6	498	1854,3	483,9
Овес	681,1	684,5	548,7	610,5	525,3	574,5
Гречка	298,5	350,7	322,1	225,8	267,2	310,5
Просо	288,1	275	126,1	132,2	215,5	288,6
Горох	758,2	954,5	1234	1711,8	1303,8	626,9
Соняшник	9735,7	9972,5	9633,8	10821,7	15373,7	11478,7

На основі даних з таблиць 1.2 і 1.1 за допомогою виразів 1.1 – 1.10 отримано оціночні дані про кількість соломи, що була отримана в 2015-2020 роках. Дані наведені в таблиці 1.3, виражені в тисячах тон.

Таблиця 1.3

Оцінка кількості соломи (в тисячах тон) отриманої з різних видів культур за 2015-2020 роки.

Культура/рік	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Пшениця	25773,3	23836,2	19213,4	25601	27167,5	25023,9
Кукурудза	3871	8936,2	3048,6	4685,9	1463,6	4787,8
Ячмінь	11108,6	11407,1	8456,9	9783,2	10721,6	9165,2
Жито	524,1	522,5	468,6	498	1854,3	483,9
Овес	681,1	684,5	548,7	610,5	525,3	574,5
Гречка	298,5	350,7	322,1	225,8	267,2	310,5
Просо	288,1	275	126,1	132,2	215,5	288,6
Горох	758,2	954,5	1234	1711,8	1303,8	626,9
Соняшник	9735,7	9972,5	9633,8	10821,7	15373,7	11478,7

Слід зазначити, що для енергетичного використання соломи доступна лише певна частина умовного врожаю, адже солома так само використовується в тваринництві, як наприклад, для корму свійських тварин, та в якості добрив, чи сировини для виготовлення добрив. В роботі [16] проведено оцінку кількості соломи доступної для енергетичного використання, й виведено коефіцієнт енергетичного використання K_{en} для відповідних видів культур. Також слід враховувати невідворотні втрати при зборі і транспортуванні соломи. Коефіцієнт таких втрат позначено як K_{los} . Одже, як показано в [15]

З метою визначення енергетичного потенціалу вище наведених культур зібрано дані про кількість вологи, целюлози, геміцелюлози та лігніну у відповідних культурах – оскільки ці три речовини відіграють найбільшу роль в утворенні енергії [17], і виведено умовні формули у перерахунку на один атом вуглецю. Дані про вміст целюлози, вологи та лігніну для різних культур наведені в таблиці 1.5.

Враховуючи те, що геміцелюлози являють собою широке сімейство складних речовин, відсотковий склад яких різниться від рослини до рослини – в даній роботі її вміст не враховується.

Таблиця 1.5

Вміст вологи, целюлози, геміцелюлози та лігніну в соломах різних культур

Культура	Лігнін(%)	Целюлоза(%)	Геміцелюлоза(%)	Волога(%)
Пшениця	24.66	31.47	21	6.94
Ячмінь	21.71	37.97	37.2	6.92
Жито	30.9	21,5	21.5	5.48
Гречка	16,97	42,1	8.38	4,89
Соняшник	10.8	37.6		7.1
Горох	12.6	46.48	17.78	3.25

Беручи до уваги те, що ці речовини сильно насичені вуглицем та воднем – виключення їх з розрахунків дає консервативну, песимістичну оцінку енергетичної цінності біомаси.

Використовуючи відомі формулу наведених вище сполук, а саме умовну формулу лігніну - $C_{63}H_6O_{31}$ та формули целюлози - $C_6H_{10}O_5$, визначено молярні маси відповідних складових.

$$M(C_{63}H_6O_{31}) = 756M(C) + 6M(H) + 496M(O) = 1258 \text{ г/моль}$$

$$M(C_6H_{10}O_5) = 72M(C) + 10M(H) + 80M(O) = 162 \text{ г/моль}$$

Молярна маса води складає 18 г/моль.

З урахуванням отриманих молярних мас складових, отримано кількість молей кожної складової в перерахунку на одну тону матеріалу

Для пшениці:

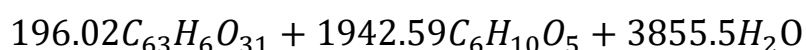
246,6 кг лігніну, 314,7 кг целюлози 69,4 кг води, що в перерахунку на молі складає:

$$\text{Лігніну} - 246.6 \times 1000 / 1258 = 196.02 \text{ моль}$$

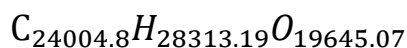
$$\text{Целюлози} - 314.7 \times 1000 / 162 = 1942.59 \text{ моль}$$

$$\text{Води} - 69.4 \times 1000 / 18 = 3855,5 \text{ моль.}$$

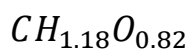
Тобто, загалом одна тонна пшениці –



або у вигляді умовною формули:



або у перерахунку на один атом вуглецю



Виконавши подібні розрахунки [6] для соломи жита, гречки, соняшнику та гороху, отримано відповідні умовні формули. Умовні формули соломи пшениці, жита, гречки соняшнику та гороху наведені в таблиці 1.6.

Таблиця 1.6

Умовні формули соломи різних культур

Культура	Умовна формула
Пшениця	$CH_{1.18}O_{0.82}$
Ячмінь	$CH_{1.29}O_{0.84}$
Жито	$CH_{1.34}O_{0.83}$
Гречка	$CH_{1.64}O_{0.94}$
Соняшник	$CH_{1.18}O_{0.82}$
Горох	$CH_{1.4}O_{0.82}$

З урахуванням даних з таблиці 1.6 – за формулою Менделєєва [18] отримано дані нижчої теплоти згорання Q_n для солом наведених вище культур:

$$Q_n = \alpha C + \beta H + \gamma S - \delta O - \eta W \quad (1.11),$$

Де C, H, S, O, W умовна кількість вуглецю, водню, сірки, кисню й води відповідно; $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \eta$ – відповідні емпіричні коефіцієнти. Дані про нижню теплоту згорання солом відповідних культур наведено в таблиці 1.7.

Таблиця 1.7

Нижча теплота згорання соломи відповідних культур

Культура	Q_n (кДж/кг)
Пшениця	14510
Ячмінь	13520
Жито	15500
Гречка	12520
Соняшник	14650
Горох	12650

Таблиця 1.8.

Умовні формули відповідних культур

Культура	Умовна формула
Пшениця	$CH_{1.18}O_{0.82}$
Ячмінь	$CH_{1.29}O_{0.84}$
Жито	$CH_{1.34}O_{0.83}$
Гречка	$CH_{1.64}O_{0.94}$
Соняшник	$CH_{1.18}O_{0.82}$
Горох	$CH_{1.4}O_{0.82}$

1.2 Енергетичне застосування соломи.

Солома як паливо має ряд переваг, як наприклад вуглицева нейтральність. Солома є як правило місцевим паливом для використання в сільському господарстві, що значно спрощує логістику доставки палива до теплової установки в порівнянні з вуглем – потребує доставки з шахт чи кар'єрів, торфу – потребує доставки з боліт на додачу до значної екологічної шкоди цього процесу [19], і особливо газу, що потребує прокладання газопроводу. Солома також є доступнішою за деревину.

Найважливішою перевагою соломи для використання як джерела енергії в Україні як видно з попереднього розділу є те, що солома є відходом потужного

аграрного сектору, що і надалі спрощує та здешевшує логістику.

Всю множину способів отримання енергії запасеною у соломі можна умовно розділити на дві категорії – безпосереднє спалювання соломи та спалювання продуктів термічної обробки соломи (піролізу).

Тим не менше, використання соломи як джерела енергії має ряд недоліків та проблем, а саме:

- Неоднорідність матеріалу [20];
- Високий вихід шкідливих летючих[21];
- Невеликий допустимий діапазон вологості – 10-25%[22] ;

Вирішення задачі енергетичного застосування соломи потребує широкого спектру технічних, програмних, апаратних і технологічних рішень. Умовно можна поділити способи добування енергії з соломи на дві категорії – безпосереднє спалювання соломи без або з мінімальною обробкою, а також зпалювання продуктів термічної без- або малоокисневої обробки соломи -піролізу та газифікації.

1.2.1 Спалювання соломи без обробки.

Спалювання соломи можна виконувати кількома способами: з автоматичним і ручним завнтаженням горючого матеріалу. У випадку спалювання соломи з ручним завнтаженням, як правило, використовують пристрої що представляють собою жаротрубні котли з великою топкою, яка оточена водяною сорочкою. Залежно від потужності, топка котла може бути пристосована для спалювання малих, циліндричних або великих тюків.

На сьогоднішній день на ринку широко представлені пристрої для спалювання біомаси у тому числі соломи з автоматичною подачею.

Одним з прикладів пристрою для спалювання біомаси без обробки є котел для спалювання солом'яної біомаси Vesko-S фірми TTS Boilers [23].

Схема та принцип дії пристрою наведено на рисунку 1.1

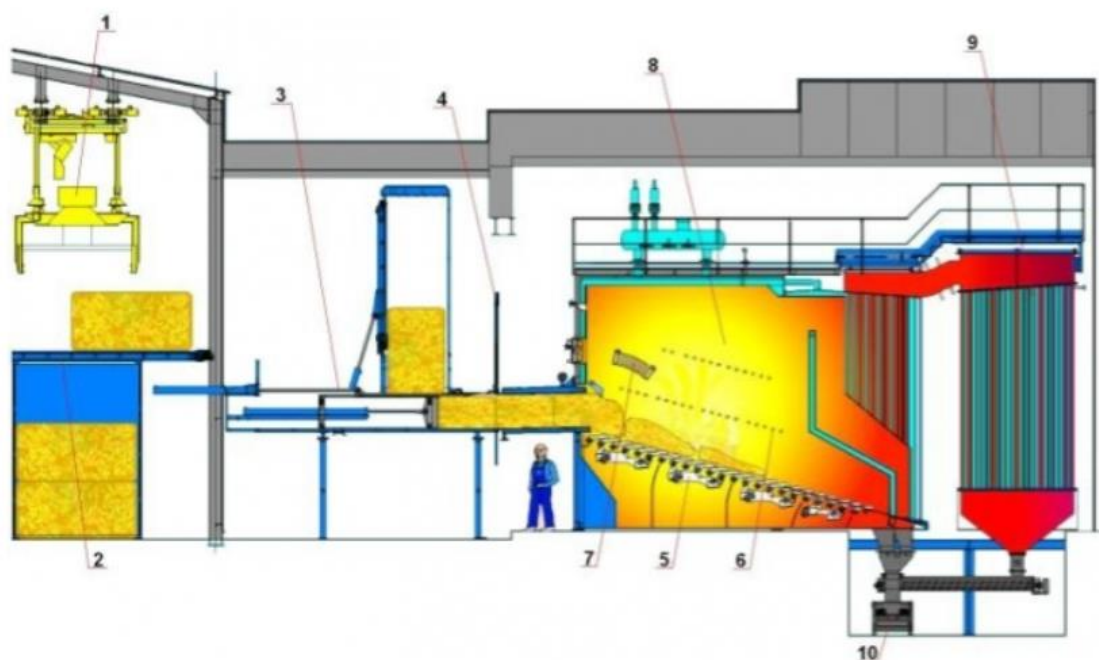


Рисунок 1.1 Принцип дії пристрою для спалювання солом'яної біомаси Vesko-S фірми TTS Boilers [23]

Паливо (у даному випадку солома) подається за допомогою конвеєра 2, який навантажується з місця зберігання тюків соломи за допомогою маніпулятора 1. Далі тюк розрізається ріжучим механізмом 3, з якого паливо поступає в робочу область пристрою – камеру згорання 8 на похилу колоскову решітку 5. Живлення розрізаними тюками соломи камери згорання регулюється за допомогою калитки 4. Живлення процесу горіння повітрям виконується знизу похилої решітки – зони 6. Запалення здійснюється за допомогою зводу запалювання 7. Стінки камери згорання охолоджуються водою. Похилена колоскова решітка – повітрям, і приводиться в дію гідравлічною системою. Зола з камери згорання виводиться конвеєром 10. Дим виводиться спочатку до конвекційного теплообмінника, а після цього – до окремого тепловідвідника 10, після чого проходить систему обезпилення вентилятора димових газів, і далі – до труби. Заявлена теплова потужність пристрою складає від 2 до 5 МВ при питомій теплотворній здатності палива від 7 до 14 МДж/кг, і вологості палива до 55 відсотків.

Дещо відмінним є рішення компанії Hurst Boiler – котел Hybrid RG.[24]

Принцип дії пристрою Hybrid RG зображено на рисунку 1.2

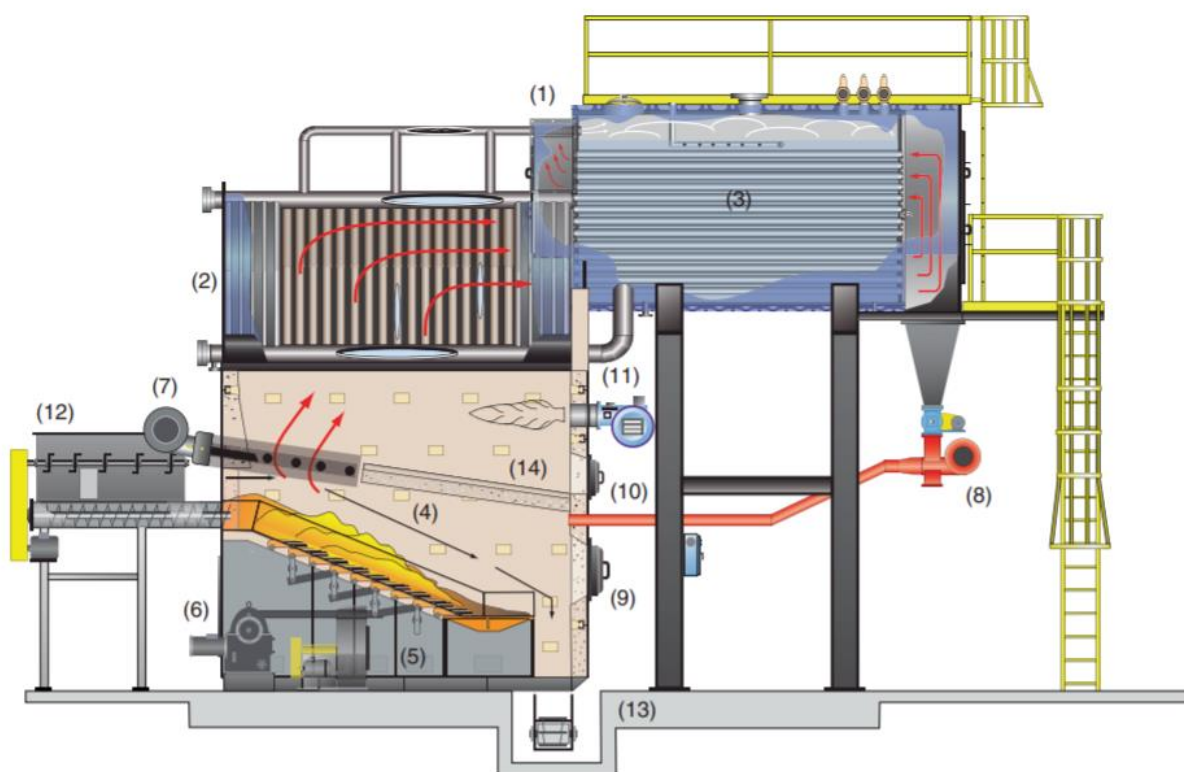


Рисунок 1.2 Принцип дії пристрою для спалювання біомаси Hybrid RG [24]

В даному пристрої живлення камери згорання паливом виконується дозуючим контейнером 12, з якої як і в попередньому пристрої солома потрапляє на похилу колоскову решітку 4. Живлення повітрям виконується за допомогою двох вентиляторів – один розміщений над полум'ям (7), інший – під ним (5). Саме наявність цих двох вентиляторів є ключовою відмінністю між даним пристроєм, і пристроєм описаним вище. Як показано в [25] висока ефективність даної установки забезпечується трьома факторами – досягнення максимально можливої одноманітності складу палива за рахунок подрібнення, створення дефіциту повітря в нижній частині камері згорання (за рахунок вентилятора 5), і його надлишку в верхній частині (за рахунок вентилятора 7). Такі пропорції повітря являють собою особливий інтерес. Як показано в [25] – ціллю забезпечення дефіциту повітря є перехід від процесу горіння до процесу термічного розкладу з утворенням летких сполук тобто фактично до процесу газифікації. Розігріті утворенні леткі сполуки піднімаються вгору, де спалюються в умовах максимально можливо наближених до стехіометричних.

Принцип роботи пристрою описаного в [24] заснований на ідеях викладених в [25], а також інші роботи, як наприклад [26], [27] вказують на доцільність з енергетичної точки зору використання біомаси не як палива безпосередньо, а як ресурс, що використовується для виготовлення більш калорійних палив в рамках процесу газифікації чи піролізу. Важливим зауваженням наведеним в [23] є необхідність вирішення проблеми неоднomanітності біомаси з метою підвищення ефективності (в енергетичному сенсі) процесу конверсії біомаси з одного боку, і забезпечення надійності й довговічності відповідних пристроїв з іншого.

1.2.2 Піроліз і спалювання продуктів піролізу соломи

Отримання енергії за допомогою піролізу соломи здійснюється за рахунок перетворення біомаси на газ чи рідке пальне, і подальше використання отриманого продукту в традиційних печах збудованих з урахуванням специфіки – як наприклад нестабільного складу піролізного палива. Однією з проблем при проведенні піролізу соломи є видалення золи з реактору з метою боротьби з надмірним зносом. В останні роки для вирішення такої задачі було розроблено такі технології як CFB та LTCFB. CFB - процес газифікації біомаси на циркулюючому рідкому дні. При CFB біомаса конвертується в газ, після чого газ спалюється в пічної установки на енергетичній станції. Дана технологія дозволяє виймати золу з пічної камери(Бойлера), що робить можливим використання різних видів палива без ризику появи грубого нальоту і корозії на стінках бойлера. У даній системі можна спалювати соломі і відходи виробництва в існуючих бойлерах для вугілля, так як можлива сепарація видів золи і їх використання окремо.

Традиційні газогенератори CFB вимагають температури 850-900 градусів, а при використанні біомаси виникає ризик плавлення золи, і, отже, висока концентрація компонентів летючого попелу може викликати проблеми при охолодженні та очищенні газу. LTCFB – подальший розвиток технології CFB – піроліз на рідкому дні низької температури. У традиційному газогенераторі CFB біомаса потрапляє в реакційний відсік, де відбувається її швидке нагрівання за допомогою циркулюючих

в системі частинок піску і попелу. У газогенераторі LTCFB основний реакційний відсік меншого розміру і температура в ньому нижче. Сенс полягає в процесі швидкого піролізу, а не газифікації коксу, що забирає багато часу. Так як процес здійснюється у відсутності кисню, біомаса не підпалюється, а конвертується в газ піролізу (80%) і кокс (20%). Частинки коксу газифікуються в окремому реакторі, куди подається повітря і водяна пара. [26]

1.2.3 Зберігання соломи

У більшості країн східної Європи найбільш поширеним методом збору і транспортування соломи є її подрібнення і накопичення в вантажних причепах. Після цього солома зберігається у великих копицях, як правило, Паркінг. Такий спосіб не зовсім підходить для зим Західної Європи, що відрізняються великою кількістю опадів і сильними вітрами.

У країнах західної Європи найбільш поширеним способом обробки соломи є пресування тюків. Солома пресується в малі, циліндричні або великі тюки. При пресуванні солома може подрібнюватися, для того, щоб тюки легко рознімати на частини при використанні в якості підстилки для тварин. Солома, призначена для спалювання, повинна зберігатися в сухих умовах. Найкраще зберігати її під дахом, наприклад, у відносно дешевих польових сараях без бічних стін (тобто під навісами) або в закритих приміщеннях. При використанні навісів, вони повинні мати великий козирок, щоб дощова вода не потрапляла на солому. Важливо забезпечити вільний доступ до соломи, щоби оминати процедуру її зберігання та завантаження-розвантаження. При переміщенні і зберіганні малих пакунків дуже зручно використовувати конвеєр.

Для операцій з великими пакунками необхідний трактор з фронтальним навантажувачем, в приміщенні повинно бути достатньо місця для маневру трактора. Можна зберігати солому під плівковим покриттям, але це не рекомендується в умовах клімату, що характеризується сильними вітрами. При зберіганні соломи на відкритому повітрі існує ризик підвищення її вологості (особливо у верхніх шарах)

до рівня, який вище допустимого для спалювання соломи (25%).

Навантаження та транспортування соломи можна організувати різними способами. Маленькі тюки можна вантажити вручну або за допомогою більш-менш складних пристроїв. Тепер на зміну малим тюкам прийшли великі або циліндричні, що значно скоротило витрати праці.

1.3 Моделі управління

В загальному вигляді задачу управління можна описати як знаходження закону управління, такого що забезпечує стабільність керованого об'єкта при вхідних збуреннях, при мінімальній похибці регулювання як після, так і під час перехідного процесу. Тобто ідеальний закон управління забезпечить точне відтворення динамічною характеристикою системи вхідного сигналу без затримки. Очевидно, що такий закон неможливий на практиці, тим не менш, на сьогоднішній день існує значна кількість способів вирішення задач управління. Ці способи можна поділити на керування за станом, керування за похибкою, релейне керування. В технологічних процесах, релейне керування використовується надзвичайно рідко через високе навантаження на систему викликане постійними перехідними процесами в ланках системи, оскільки сингал управління в такому випадку фактично є щільно запакованою в часі послідовністю стрибків, що є наближенням до послідовності дельта функцій. Керування за похибкою як правило виконується за допомогою П, ПІ, ПД, чи ПІД регулятора, причому ПІ регулятор є на сьогоднішній день найпопулярніший[27]. Даний метод забезпечує хорошу якість управління, при мінімальній інформації про систему – для коректної роботи необхідна лише інформація про виходи об'єкта управління - однак найголовнішим його недоліком – як і всіх методів керування за похибкою є його емпіричність, що ускладнює формалізацію процесу налаштування регулятора, що в свою чергу призводить до ускладнення оцінювання часу необхідного для розробки регулятора – важливий чинник в промисловості. Дану проблему обходять за допомогою методів машинного навчання, як наприклад налаштування коефіцієнтів регулятора за допомогою

нейронних мереж чи генетичних алгоритмів. Дані методи перекладають «емпіричну» частину розробки регулятора на комп'ютер, зменшуючи ризики уповільнення розробки за рахунок інвестування часу в реалізацію вище згаданих алгоритмів та тим не менш – по перше проблема залишається, адже жоден з алгоритмів машинного навчання не гарантує ані сходимості ані оптимального вирішення задачі, а по друге – імплементація алгоритмів і відповідного програмного забезпечення потребує додаткового часу та ресурсів.

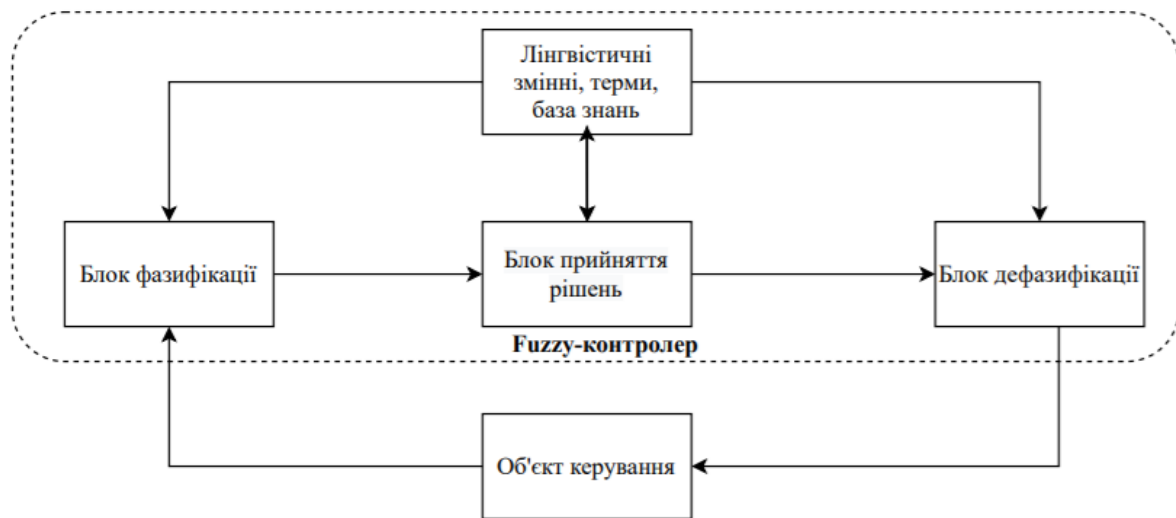
Інші методи побудови регулятора засновані на керуванні за станом – такі як метод розміщення полюсів чи лінійного квадратичного керування. На відміну від методів керування за похибкою, вони добре формалізовані – а саме відомі математичні перетворення й функції, за допомогою яких систему можна привести до бажаних параметрів керування. Недоліком такого підходу є те, що хоча на етапі моделювання відслідковувати стани моделі як правило нескладно – необхідність відстежування всіх станів системи на безпосередньому об'єкті управління, яких може бути на порядок більше, ніж виходів – в даній роботі розглядається система з 5 виходами і 20 станами, і встановлення датчиків для відслідковування кожного стану значно здорожчує систему а іноді взагалі не є можливим. Існує кілька способів обходу цього недоліку – як наприклад, методи оцінки стану за виходами системи [28], [29], при чому [28] – вважається промисловим стандартом. При чому точність керування при оцінці стану як правило дещо нижче.

Також останнім часом активно розвивається використання Machine Learning підходів для реалізації законів управління, а саме використання нечіткої логіки, нейромереж чи нечітких нейромереж. Для технічної реалізації пристрою керування використовуються як правило мікроконтролерні рішення.

В роботі [29] наведено систему управління технологічним процесом з використанням нечіткої логіки. Теорія нечіткої логіки пов'язана з ім'ям

Лотфі Заде, її засновник, свій науковий підхід описав в 1973 р в роботі «Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes», опублікованій в журналі IEEE Transactions on Systems. Результатом стало успішне впровадження викладених принципів для удосконалення системи управління

складним виробничим процесом. Але при всіх заслугах Л. Заде не менш важливий внесок внесли і послідовники цієї теорії. Перший алгоритм на нечіткій логіці реалізував в 1975 р англійський математик Е. Мамдані (Ebrahim Mamdani). Структурна схема системи управління з нечіткою логікою представлена на рисунку 1.3



1.3 Структурна схема системи управління з нечіткою логікою.

Розглянемо докладніше структуру системи. Фазифікація - процес перетворення звичайних чітких змінних в нечіткі. Діапазон зміни змінної розбивається на безлічі (підмножин), в межах кожного з яких будується функція приналежності змінної кожному з множин. Найчастіше функції приналежності мають трикутну, найбільш поширену форму, хоча в загальному випадку вони можуть бути будь-якими виходячи зі змісту розв'язуваної задачі. Для нечітких множин існує загальноприйнята система позначень. Для виконання функції регулювання над нечіткими змінними повинні бути виконані операції, побудовані на підставі висловлювань оператора, сформульованих у вигляді нечітких правил. Сукупність нечітких правил нечітких змінних використовується для здійснення нечіткого логічного висновку, результатом якого є керуючий вплив на об'єкт управління. Згідно дослідженням, проведеним в виробничих умовах технологічний процес автоматично підлаштовувався під температурні умови функціонування, і система виявляла властивість адаптивності. Нечіткий регулятор на об'єкті підвищує

рівень автоматизації управління за рахунок автоматизації інтелектуальних функцій технолога, що проводив процес в умовах використання звичайного багатоканального регулювання параметрів процесу.

В роботі [30] запропоновано систему управління з використанням синергетичного управління. В цій роботі в якості об'єкта управління використовується рідкофазний хімічний реактор, що являє собою ємнісний апарат безперервної дії, що працює в політропічному режимі. Принципова відмінність пропонованого підходу до синергетичного синтезу системи автоматичного управління тепловим режимом реактора від «класичного» підходу (АКАР на основі послідовного введення інваріантних різноманіть) полягає в наступному. При використанні «класичного» методу АКАР реалізується каскадний синтез системи автоматичного управління, при якому відбувається динамічна декомпозиція моделі зі зменшенням її розмірності на одиницю після першого етапу синтезу (визначення зовнішнього управління, який переводить об'єкт наперший інваріантне різноманіття). На другому етапі визначається закон зміни внутрішнього управління, що забезпечує рух об'єкта вздовж першого різноманіття в кінцевий стан. У пропонованому підході попередньо здійснюється декомпозиція об'єкта і отже динамічної моделі на дві супідрядні підсистеми. На першому етапі визначається внутрішнє управління, що переводить об'єкт в заданий кінцевий стан, а на другому – зовнішнє управління, що забезпечує обчислене значення внутрішнього. Помилка регулювання в статиці може бути зменшена за рахунок збільшення швидкості зміни u_1 , тобто зменшення T_1/T_2 або введення інтегральної складової в алгоритм управління. В цілому синтезована система автоматичного управління тепловим режимом виявилася працездатною і може бути рекомендована до застосування при реалізації реакцій довільного типу

Також інтерес представляє запропонована в [31] система управління горінням в піролізній установці за допомогою електричного поля. Як матеріали досліджень була використана теорія горіння, теорія іонізації полум'я, а також інформація про сучасні промислові котли. Дане дослідження виявило таке.

1. Для управління горінням в піролізних котлах, зниження інерційності

процесу, розширення його діапазону, а також для зменшення ризику виділення окису вуглецю доцільно використовувати електричне поле напруженістю від 1 до 7 кВ / см.

2. Електричне поле в котельній камері котла може бути утворено напругою, поданим до коропкородібною ємності з струмопровідного матеріалу і розташованому над нею сітковому електроді. При цьому сітковий електрод виконується у вигляді рамки, з розташованою всередині неї сіткою, в вузлах якої закріплені голкоподібні елементи, спрямовані вниз.

3. Зміна напруженості поля можливо за рахунок варіювання електричної напруги, а також відстані між коропкоподібною ємністю і сітчастим електродом.

4. Управління процесом горіння за відсутності помилки в сталому режимі і мінімальної помилки по швидкості може бути досягнуто при реалізації пропорційно-диференціального закону формування керуючого впливу.

1.4 Моделі технологічного процесу піролізу.

Для енергетичних цілей, рослинна біомаса, в основному, використовується при застосуванні фізичних (сушіння, подрібнення, грануляція) і термохімічних процесів конверсії (пряме спалювання, газифікація і піроліз).

Під час розгляду технічних, економічних і екологічних аспектів енергетичного використання рослинної біомаси, технологія прямого спалювання на сьогодні набула найбільшого поширення. Процес спалювання проходить при температурі 1500-2000 °C і представляє собою комплекс складних фізико-хімічних процесів: сушіння (видалення вологи), прогрівання (вихід летких) і взаємодію продуктів піролізу з повітрям до утворення, переважно, двоокису вуглецю, водяної пари та золотого залишку. Ці процеси мають свою специфіку і різний вплив на загальний процес згоряння кожного виду палива, оскільки вони мають різну швидкість, тривалість і умови проходження. Так, наприклад, при згорянні пиловидного палива, тривалість процесу прогрівання і виходу летких складає не більше 10% загального часу вигорання, решта часу приходить на вигорання коксового залишку [32]. При цьому,

якщо кількість потенційної теплоти летких і коксу майже однакова, то інтенсивність тепловиділення за одиницю часу, в період виходу летких, є приблизно в 10 разів більша, ніж при згорянні коксового залишку. Ці фактори значною мірою впливають на перебіг всього процесу згоряння. Вони потребують відповідного повітряного режиму в топці, що часто і є основною перешкодою до ефективного спалювання твердого палива. Іншою проблемою при спалюванні рослинної біомаси, особливо це стосується міських деревних відходів, є самі відходи. Переважно, це суміш різних (листяні, хвойні) і малоцінних порід деревини (тополя, осика, вільха та ін.), з широким спектром фракційного складу та з високим вмістом вологи (до 55-60%). Така висока вологість призводить до зменшення теплоти згоряння більше ніж в 5 разів, що викликає значні труднощі при спалюванні. Серед них є технічні труднощі, обумовлені необхідністю забезпечення надійності горіння палива з малим надлишком повітря, поліфракційністю та нестабільним складом палива і його характеристик у часі. Все це потребує застосування, не тільки спеціальної техніки і технологій спалювання, але й відповідної підготовки палива, для покращення теплотехнічних характеристик. Так, для спалювання біомаси деревини найбільшого поширення набув цілий ряд топкових пристроїв, де реалізується шаровий процес спалювання на колосниковій решітці [33], для спалювання крупних дров використовують шарові топки [33,34,35], а для дрібних фракцій – камерні [33,35], вихрові топки [33], чи передтопки [35,36]. Проте, і ці пристрої в повній мірі не дозволяють з високою ефективністю утилізувати весь спектр рослинної біомаси (наприклад, є певні труднощі під час спалюванні кори, шлаків, лігніну, є обмеження по фракційному складу, вологості та ін.). Не вдається повністю виключити і механічний недопал. Тому, не дивлячись на існування цілої низки різних технологій спалювання, проблема ефективного використання енергії рослинної біомаси в Україні все ж лежить в технічній площині. Це також пов'язано і з тим, що внаслідок «газового буму» в Україні, в середині минулого століття, основна маса енергетично обладнання була переведена на природний газ. Існуючі ж твердопаливні котли, які працювали на рослинній біомасі, були демонтовані, а їх наукова та промислова база виробництва, практично, зруйновані. Вартість же зарубіжної техніки дуже висока. Оскільки, на сьогодні, значна частина теплоенергетичних установок в

Україні працює на природному газі, то зрозуміло, що чисто технічно вони не пристосовані до спалювання твердої рослинної біомаси. Хоча, для широкого використання біомаси в теплоенергетиці, найбільш перспективною технологією вбачається така технологія, яка дозволила б безпосередньо використовувати біомасу в існуючих теплоенергетичних установках. Це дозволить зберегти існуючий парк теплоенергетичних установок, підвищити його енергобезпеку, зекономити значну кількість викопних палив і зменшити шкідливі викиди. В зв'язку з цим, одним з перспективних способів адаптації існуючого теплоенергетичного обладнання до використання рослинної біомаси як альтернативного палива, вбачається в її попередній конверсії. Такі технології представляють собою сукупність високотемпературних тепло-технологічних процесів, змістом яких є фізико-хімічне перетворення органіки палива в нові газоподібні, рідкі та тверді енергетичні продукти. Перевагами процесів термохімічної конверсії є: - можливість піддавати конверсії будь-яку рослинну біомасу, незалежно від її хімічного складу, складу золи, домішок сірки, фракційності, вологості та ін.; - можливість отримання твердого і рідкого палива, чи горючого газу визначеного складу, які можна використовувати для енергетичних установок; - можливість масштабування, для забезпечення горючим газом, як великих підприємств чи населених пунктів, так і невеликих автономних енергетичних і хімічних об'єктів. По способу підведення додаткової теплоти піролізні процеси можна поділити на три типи: - до першого типу відносяться процеси із зовнішнім підведенням теплоти через стінку апарату, як, наприклад, в ретортах періодичної дії вагонного типу «Арканзас» [37], чи в ретортах абеляційного піролізу [38] та ін. В цих апаратах можна піддавати піролізу всі види твердої рослинної біомаси, незалежно від фракційного складу, вмісту золи і температури її шлакування. Важливим їх достоїнством є відсутність розбавлення газової фази баластними компонентами. Проте, такій схемі підведення теплоти притаманна громіздкість апаратурного оформлення і низька його енергетична ефективність, оскільки складно реалізувати рівномірну передачу теплоти від стінки до палива по товщині шару, а відтак маємо малу швидкість та продуктивність процесу і нерівномірну якість кінцевого продукту по товщині шару. - до другого типу відносяться процеси з

внутрішнім обігріванням, коли теплоту необхідну для проведення термічного розкладу, отримують за рахунок спалювання частини вихідного палива завантаженого в апарат. При цьому, швидкість горіння і температура процесу регулюються кількістю повітря, що надходить в апарат. Такий принцип обігрівання використовується, наприклад, в печах Хоррешоффа [37].

1.5 Постановка задачі дослідження

Для сучасної української держави, з урахуванням особливостей її географічного положення та наявності певного виду енергоресурсів, перспективним напрямком розвитку енергетичної галузі може стати розумне використання в енергосистемі установок з ПДЕ. Але запропоновані до розгляду установки мають важливий недолік – нестабільна величина теплотворної здатності утворених продуктів, нахталт синтез-газу.

Очевидно, що нестабільність теплотворної здатності продуктів енергодобувних установок з ПДЕ стримує розвиток цього напрямку.

Одним з головних завдань дисертаційного дослідження можна вважати розробку імітаційних моделей установок піролізу відходів агропромислових технологій, як об'єкта керування, для підвищення стабільності теплотворної здатності продуктів переробки відходів агропромислових технологій, що дасть змогу збільшити частку енергоустановок з ПДЕ, що в свою чергу дасть змогу отримати додатковий енергетичний ресурс.

В подальшому пропонується розглянути моделювання процесів повільного піролізу. Загальноприйнятий підхід передбачає використання індивідуальної моделі для опису окремого процесу. Але пропонується використовувати загальну модель процесів піролізу, газифікації та горіння. Зазначені процеси не мають між собою різких меж, і можуть плавно переходити з одного в інший зі зміною зовнішніх впливів. За схожості фізико-хімічних процесів, склад продуктів реакцій, які визначаються на межах з використанням суміжних моделей, різняться. У найбільш загальному вигляді завдання, пов'язані зі спалюванням, газифікацією і повільним

піролізом, вирішуються на основі єдиної моделі. Рішення ускладнюється можливістю непередбачуваної зміни складу вхідних і вихідних речовин. Крім того, вихідні речовини можуть знаходитись у різних фазових станах: газоподібному, рідкому, твердому.

За основу єдиної моделі прийнята вже розроблена система рівнянь, що описує процес спалювання органічного палива невідомого складу. Параметрами моделі, які визначаються, є парціальні тиски продуктів реакції. За такого підходу їхній стан вважається газоподібним. Особливістю єдиної моделі, яку необхідно розробити, повинна стати можливість урахування в продуктах реакції конденсованої фази (вуглистого залишку), характерного для повільного піролізу.

Для єдиної моделі, яка описує процеси спалювання, газифікації та піролізу, процеси розрахунків повинні мати відмінності. Під час дослідження процесів спалювання та газифікації визначається температура продуктів реакції, спираючись на рівність їх ентальпії та ентальпії вихідних речовин. Під час дослідження процесу піролізу температура реакції та її продуктів задається.

Наступною задачею дисертаційного дослідження повинна бути розробка моделі автоматизованої системи керування і методу керованого піролізу для утилізації відходів агропромислових технологій змінного складу. Це дасть змогу виробляти додатково синтез-газ із максимальною теплотворною здатністю.

Виконані попередні дослідження довели можливість розробки методу побудови КІСУ керуванням процесу піролізу відходів агропромислових технологій, таку, що забезпечує стабільність теплотворної здатності отриманого синтез газу за наявності збурень складу відходів у визначених межах. Тому в заключній частині дисертаційного дослідження необхідно розробити метод побудови КІСУ, що забезпечує стабільність теплотворної здатності отриманого синтез газу за наявності збурень складу відходів у визначених межах. Тому, виходячи з викладених завдань, метою роботи є вдосконалення методів і моделей автоматизованого управління енергетичною установкою, що використовує відновлювальні джерела енергії для підтримки сталого значення теплотворної здатності утвореного синтез-газу за рахунок визначення складу відходів, що проходять процес піролізу, компенсації

збурень цього складу і переміщення такої установки в клас регульованих із підвищенням її енергетичної ефективності.

1.6 Висновки до першого розділу

1. Оцінено енергетичний потенціал біомаси відходів агротехнологій в Україні, виведено умовні брутто-формули відходів від врожаїв найпопулярніших культур.

2. Проаналізовано існуючі підходи і методи побудови комп'ютерно інтегрованих систем управління установками піролізу біомаси.

3. Виявлено існуючі на сьогоднішній день недоліки в побудови комп'ютерно інтегрованих системах управління установками піролізу біомаси, які полягають в недостатньому застосуванні рівнянь і залежностей хімічної кінетики піролізу, що в свою чергу обмежує використання енергетичного потенціалу біомаси відходів агротехнологій.

4. Виконано класифікації культур, з якої отримано солону умовною брутто-формулою.

РОЗДІЛ 2. ПОБУДОВА МОДЕЛІ ПІРОЛІЗНОЇ УСТАНОВКИ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ.

У цьому розділі визначено вид закону керування, розроблено модель процесу піролізу, розроблено модель і метод визначення складу відходів агротехнологій,

Розроблено модель піролізної установки відходів агротехнологій як об'єкта керування, визначено вплив збурень складу відходів агротехнологій на динамічну поведінку об'єкта керування..

У другому розділі вирішені такі завдання:

- визначення виду закону керування, який уможливилює досягнення стабільного і високого значення теплотворної здатності отриманого синтез-газу;
- розробка імітаційної моделі, процесу піролізу відходів агротехнологій;
- розробка моделі піролізної установки як об'єкта керування
- визначення впливу збурень у складі відходів агротехнологій на динамічну поведінку об'єкта керування.

2.1 Модель керування піролізною установкою.

Як показано в попередньому розділі, біомаса в Україні має значний енергетичний потенціал. Зважаючи на те, що в технологічних процесах, пов'язаних з горінням палива одним з найважливіших параметрів є теплота згорання палива Q_n . Попереднє визначене цієї величини використовується в розрахунках відповідних технологічних процесів і налаштуванні контурів управління, що зумовлює використання сертифікованих палив. В такому контексті реалізацію енергетичного потенціалу біомаси беручи до уваги невизначенність її складу доцільно розглядати шляхом включення продуктів піролізу та або газифікації в існуючі технологічні установки. При чому, з урахуванням вище сказаного, слід забезпечувати не тільки максимальну калорійність продуктів піролізу чи газифікації, але й постійність цієї теплотворної здатності. В даній роботі розглянуто процес піролізу біомаси і вирішується задача забезпечення максимальної і стабілізації калорійності летючих продуктів піролізу – синтез-газу.

В такому випадку, формально задачу управління можна записати наступним чином - маючи те, що Q_n – спостережувана величина, яка в кожний дискретний момент часу визначається як:

$$Q_n = Af_{pyr}(x) \quad (2.1)$$

де - A – вектор стану піролізного реактора;

$f_{pyr}(x)$ – функція, що визначається динамікою процесу піролізу. Аналітична форма даної функції невідома, її оцінка проводиться шляхом статистичного аналізу експериментальних даних досліджень процесу піролізу біомаси. З іншого боку, x – неспостережувана сума керуючого впливу u , та змінної відхилення

$$x = u + z \quad (2.2)$$

Отже, задачею є знаходження такої послідовності керуючих впливів, $u(1), u(2) \dots u(n)$, такі що :

$$Af_{pyr}(x) \rightarrow Q_{nmax} \quad (2.3)$$

де Q_{nmax} – шуканий максимум функції калорійності синтезу газу.

Для імплементації даного закону управління, необхідно вирішити ряд практичних задач, одним з яких є вимірювання величини, максимум якої забезпечує КІСУ. З цією метою необхідно використовувати калориметр реального часу. На сьогоднішній день такі системи існують, як наприклад калориметр реального часу CWD-2000-2005 [41], однак слід зазначити складність і дороговизну даного пристрою, а також те, що забезпечення роботоздатності такої складної компоненти в реальних умовах тягне за собою необхідність вирішення цілого ряду інженерних задач. Також недоліком екстремальної системи управління буде те, що під час пошуку оптимуму, значення Q_n буде змінюватися за законом, що складно піддається прогнозуванню. Також слід відзначити те, що змінність складу сировини в реакторі призведе до дрейфування точки екстремуму функції $Q_n(t)$. Крім того, як показано на рисунку 2.1. функція $Q_n(\alpha)$, що очевидно безпосередньо впливає на поведінку $Q_n(t)$ в умовах змінного складу біомаси, має декілька точок екстремуму. З урахуванням всього вищезазначеного можна підсумувати що реалізація екстремального закону управління буде проблематичною.

З іншого же боку - калорійність отриманого синтез газу залежить від значної кількості чинників, таких як температура, волога, склад сировини, коефіцієнт надлишку окислювача. Так, в дослідженнях [42], [43] була виведена наступна залежність:

$$Q_I^d = Q_{I0}^d (1 - k(Q_1 - G_0 V_0)^2) \quad (2.4)$$

де Q_I^d - теплотворна здатність отриманого синтез газу, Q_{I0}^d - коефіцієнт теоретично максимально можливої теплотворної здатності газу в залежності від вхідної сировини, V_0 - об'єм повітря необхідний для піролізу 1 моль сировини – залежить від хімічного складу сировини, k – коефіцієнт пропорційності, що визначається аналітично чи експериментально для кожної сировини. З рівняння 2.2 випливає, що за умови присутності в реакторі сировини деякого складу, забезпечення присутності кількості повітря, що відповідає V_0 - максимізує теплотворну здатність продукт-газу.

В роботах [44, 45, 46] наведено визначені експериментально криві значення калорійності в залежності від витрат поданого на реверс синтез газу і коефіцієнту надлишку окислювача в реакторі.

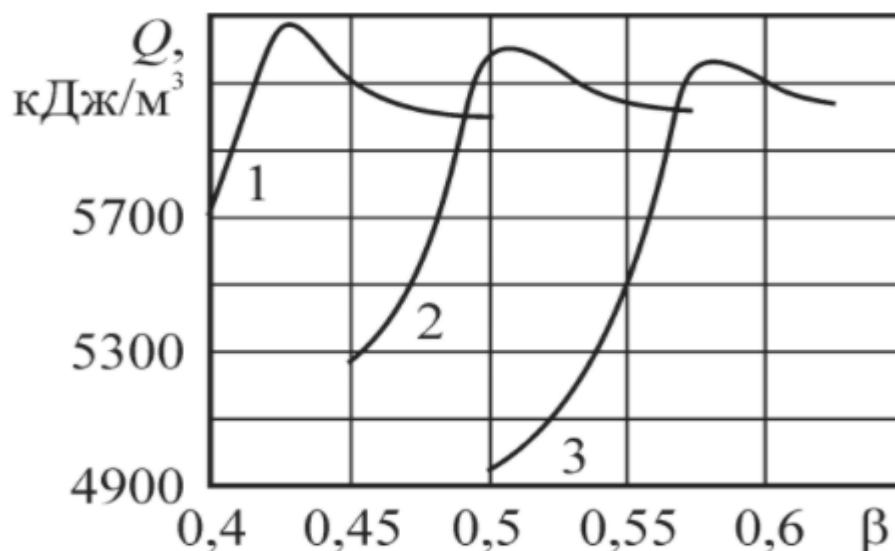


Рисунок 2.1 Залежність теплотворної здатності синтез-газу Q від коефіцієнту надлишку окислювача β , і витрат реверс газу (графіки 1-3)

Виходячи з рисунку 2.1 та виразу (2.4) видно, що теплотворна здатність синтез газу залежить від коефіцієнту надлишку окислювача, також очевидним є те, що висока калорійність синтез-газу може буде отримана тільки за певних температурних режимів.

Коефіцієнт надлишку окислювача α можна визначити кількома способами, як наприклад:

$$\alpha = \frac{M_O}{M_F} \quad (2.5)$$

де M_O – молярна маса окислювача, M_F – молярна маса палива.

З урахуванням вище сказаного вираз (2.1) можна переписати в наступному вигляді:

$$Q_n = f_{pyr}(f_{state}(M_O, M_F), t) \quad (2.6)$$

де t – температура в реакторі, $f_{state}()$ – функція стану піролізного реактора, що являється власне піролізним реактором. В такому випадку набуває сенсу така модифікація цільової функції (2.3)

$$f_{pyr}(f_{state}(M_O, M_F), t) \rightarrow Q_{nmax} \quad (2.7)$$

M_F – значення, що напряду залежить від бруто формули сировини – в даному випадку біомаси.

За умови визначення бруто-формули сировини, можливо визначити значення коефіцієнту надлишку окислювача таке, що частина виразу (2.4) – $k(Q_1 - Q_0 V_0)$ дорівнює 0, що очевидно тягне за собою досягнення максимуму функції (2.4), а відтак, і виконання умови (2.7), що і є умовою вирішення задачі управління. Іншими словами, знання бруто формули сировини дозволяє відійти від реалізації екстремального регулятора, і замість цього реалізовувати наступний закон управління:

$$u = K_1(f_\alpha(M_O, M_F) - f_{\alpha'}(M_F)) + K_2(t - t_{opt}) \quad (2.8)$$

де K_1, K_2 – пропорційні коефіцієнти регулятора, u – вектор керуючих впливів, $f_\alpha(M_O, M_F)$ – функція коефіцієнту надлишку окислювача, що визначається за (2.5), $f_{\alpha'}(M_F)$ – оптимальне значення коефіцієнту надлишку окислювача в залежності від бруто-формули палива – можливо визначити для M_F шляхом вирішення рівняння – $k(Q_1 - Q_0 V_0) = 0$ відносно V_0 t – температура в реакторі,

t_{opt} – оптимальна температура для даної речовини, визначається експериментально, чи за допомогою довідкових таблиць.

Для реалізації закону управління (2.8) необхідне експериментальне чи теоретичне дослідження процесу піролізу з метою знаходження t_{opt} , $f_{\alpha'}(M_F)$. У випадку теоретичного дослідження, необхідно розробити модель, що відповідає наступним вимогам.

- дозволяє оцінити теплотворну здатність синтез газу.
- відображає динамічні характеристики установки, а саме зв'язок між витратами окисника, сировини, палива і витратами синтез газу та температурою в реакторі.
- бере до уваги розрахунок бруто формули, чи молярної маси сировини.
- враховує зміни динамічних характеристик об'єкта управління в умовах змін складу відходів агротехнологій.

2.2 Модель нечіткої кластеризації та класифікації видів соломи

Слід окремо зауважити, що в роботах [47], [48], [49], [50] були експериментальним шляхом визначені такі температури піролізу відходів агропромислових технологій, що призводять до найвищого значення теплотворної здатності синтез газу, тобто – температурні режими оптимальні для роботи біоенергетичної установки в режимі перетворення сировини на газ. В цих роботах було визначено оптимальні температури для соломи таких культур, як пшениця, овес, рис, ячмінь. При чому, дослідження проводилися для повністю висушеної соломи – це означає, що при розробці інтегрованої системи слід віддавати перевагу технологічним схемам, що включають процес сушіння соломи відходів агротехнологій. Результати вище наведених досліджень – відповідність між культурою і температурою наведені в таблиці 2.1

Таблиця 2.1

Відповідність між культурою і оптимальною температурою (°C) піролізу

пшениця	525
овес	600
рис	700
ячмінь	600

Співставивши таблиці 2.1 і 1.8, можна зробити висновок про неповноту даних про оптимальні температури піролізу різних культур відходів агропромислових технологій. З іншого боку, слід зазначити певний рівень умовності даних в таблиці 1.8 – адже точний склад соломи залежить від таких чинників, що важко піддаються прогнозуванню і оцінці, а саме регіон збору урожаю, ґрунт, використання добрив, інсоляція в рік вирощування, і т.д. Як показано у [51], в такому випадку доцільно використання кластеризації на основі нечітких множин. З використання такої кластеризації можливо об'єднати культури в множини на основі їх складу, призначити кожній множині оптимальну температуру, використовуючі дані з таблиці 2.1. Виконавши ці операції, запропоновано визначати приналежність культури, щодо якою здійснюється піроліз, а також рівень її потрапляння в цю множину, і визначити оптимальну температуру для даної речовини як:

$$t_{opt} = L * t_{base}, \quad (2.9)$$

де t_{opt} – визначена оптимальна температура піролізу, t_{base} – температура, що відповідає визначеному кластеру, L – ступінь потрапляння в кластер.

В [52] розроблено метод кластеризації, що задовольняє вимогам даної роботи. В [9] розроблено метод нечіткої класифікації та кластеризації, що полягає в наступному:

- дані з таблиці 1.6, позначено центри кластерів.
- дані з таблиці 2.1, були нормовані таким чином, щоб кількість зібраної соломи була представлена радіусом навколо центру відповідного кластера.
- враховуючи, що дані в таблиці 1.6 є найбільш середнім значенням валової формули соломи відповідної культури, ступінь належності до кластеру виражали як функцію нормального розподілу.

$$L = f(x) = \frac{1}{k\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2k^2}\right), \quad (2.10)$$

де $f(x)$ – значення ступеня входження в кластер, k – радіус кластера, визначений, як показано вище.

2.3 Розробка моделі процесу піролізу відходів агротехнологій.

Фізика і хімія процесу піролізу біомасу має такі особливості – по перше продукти реакції, що розглядаються перебувають в газоподібному стані, по друге – переважно вуглеводневий склад сировини (біомаси) – а саме те що переважна кількість речовини що розглядається зосереджена в целюлозі, і лігніні - призводить до обмеженого списку речовин, що власне приймають участь в хімічних реакціях. Якщо враховувати тільки ті речовини, кількість яких така, що не є доцільним відкинути їх за порядком малості, то залишаться тільки кисень (O), водень (H), вуглець (C). Іншим можливим спрощенням є заміна в розрахунках повітря на кисень, оскільки азот, що міститься в повітрі – інертний, і участі в реакціях не бере, а домішки інших речовин, як, наприклад, вуглекислого газу – статистично не значимі. Отже, як показано в [1] список газів, які можуть утворюватися в ході реакцій виглядає наступним чином:

$$[CO], [CO_2], [H_2O], [OH], [NO], [H_2], [O_2], [N_2], [H], [O], [N], [C] \quad (2.11)$$

Нехай склад палива заданий брутто формулою:

$$C_{b_c} H_{b_H} O_{b_O} N_{b_N}, \quad (2.12)$$

де b_c, b_H, b_O, b_N – кількість атомів вуглецю, водню, кисню, азоту відповідно.

Для наступних речовин $[CO], [CO_2], [H_2O], [OH], [NO], [H_2], [O_2], [N_2]$ – записано рівняння закону діючих мас а саме, для CO_2 :

$$K_{CO_2} = \frac{P_C P_O^2}{P_{CO_2}}, \quad (2.13)$$

K_{CO_2} – константа хімічної рівноваги. Значення цієї константи окреме для різних температур утворення CO_2 , з C, O. Це таблична величина. P_C, P_O^2, P_{CO_2} – парціальні тиски відповідних компонентів. Таким самим чином для решти речовин:

Для CO :

$$K_{CO} = \frac{P_C P_O}{P_{CO}}, \quad (2.14)$$

Для H_2O :

$$K_{H_2O} = \frac{P_O P_H^2}{P_{H_2O}}, \quad (2.15)$$

Для OH :

$$K_{CO} = \frac{P_H P_O}{P_{OH}}, \quad (2.16)$$

Для NO :

$$K_{NO} = \frac{P_N P_O}{P_{NO}}, \quad (2.17)$$

Для H_2 :

$$K_{H_2} = \frac{P_H^2}{P_{H_2}}, \quad (2.18)$$

Для O_2 :

$$K_{O_2} = \frac{P_O^2}{P_{O_2}}, \quad (2.19)$$

Для N_2 :

$$K_{N_2} = \frac{P_N^2}{P_{N_2}}, \quad (2.20)$$

Вар'юючи відповідним чином кількості палива, можна забезпечити тотожність концентрацій компонентів і їх парціальних тисків. Молярна маса палива M_T є також невідомою, що потребує визначення. Для компонентів $[H]$, $[O]$, $[N]$, $[C]$ записано рівняння закону збереження речовини з урахуванням M_T . Одже, для C :

$$M_T b_C = P_{CO_2} + P_C + P_O^2, \quad (2.21)$$

Для H :

$$M_T b_H = P_{H_2O} + P_H + P_H^2, \quad (2.22)$$

Для N :

$$M_T b_N = P_{N_2} + P_N^2, \quad (2.23)$$

Для O :

$$M_T b_O = P_{CO_2} + P_{H_2O} + P_O^2, \quad (2.24)$$

Так само як і в рівнянні (2.11) парціальні тиски тотожні концентраціям, за

міркуваннями описаними вище. Система рівнянь замикається законом Дальтона:

$$P_{\Sigma} = \sum_i P_i, \quad (2.25)$$

де P_{Σ} – тиск в камері згорання P_i – парціальні тиски компонент (2.20).

З метою усунення можливих похибок і помилок, що можуть виникнути через різницю в 10-15 порядків між значеннями парціальних тисків, система логарифмується. Таким чином, утворено систему нелінійних алгебраїчних рівнянь. У процесі лінеаризації похідні визначені не через відповідні змінні, а їх логарифми. Таким чином:

$$\frac{d \sum_i \{\ln[f(P_i)]\}}{d[\ln(P_i)]} = \frac{\sum_i d\{\ln[f(P_i)]\}}{d[\ln(P_i)]}, \quad (2.26)$$

У випадку вирішення системи рівнянь (2.21)-(2.32) для піролізу, необхідно також взяти до уваги процес утворення вуглистого залишку [53]. Таким чином, система рівнянь (2.21) –(2.32) замикається рівнянням:

$$K_U(T) = \frac{P_C}{P_U}, \quad (2.27)$$

Де P_C – парціальний тиск вуглецю, P_U – концентрація вуглицевого залишку, K_U – відповідна константа хімічної рівноваги.

Після логарифмування рівняння (2.35) буде мати вигляд:

$$\ln(P_C) - \ln(P_U) - \ln[K_U(T)] = 0, \quad (2.28)$$

з особливостей моделі проявляється у разі лінеаризації рівняння (2,36).

Концентрація P_U для заданої температури не змінюється. Похідна відповідного члена рівняння (2.36), на відміну від інших рівнянь виду (2.28), дорівнює нулю.

Лінеаризоване рівняння має вигляд:

$$1 \cdot \Delta[\ln(P)] = (-1) \cdot \{\ln(P) - \ln(P_U) - \ln[K_U T]\}, \quad (2.29)$$

У цьому виразі знак $(\cdot)$ позначає початкове наближення, і в правій частині використовуються відповідні початкові наближення P_C та P_U , або величини з попереднього кроку розрахунку.

У записі закону збереження речовини величина P_U враховується в балансі кількості атомів вуглецю, і рівняння (2.37) має вигляд:

$$M_T \cdot bC = P_{co} + P_{co_2} + P_U + P_c, \quad (2.30)$$

У записі закону Дальтона (2.36) величина P_U не враховується в силу малого питомого об'єму.

Розрахунки на основі запропонованої моделі простіші для випадку піролізу порівняно зі спалюванням і газифікацією. Так, для випадку піролізу температура продуктів реакції задається, й ітераційний процес обчислень обумовлений тільки рішенням нелінійної системи рівнянь. Під час розрахунку процесів спалювання та газифікації сама температура продуктів згоряння знаходиться в межах зовнішнього кроку ітераційного процесу.

Отже, обрано і адаптовано єдину модель для вирішення завдань спалювання, газифікації та повільного піролізу за відомого складу вихідних вуглеводневих речовин. Варіанти моделі для розрахунку різних процесів відрізняються урахуванням наявності конденсованої фази вуглистої речовини. В межах розрахунку процесу спалювання і газифікації визначається температура продуктів згоряння. Для піролізу температура продуктів реакції задається.

З метою зменшення громіздкості без зміни спільності викладу модель будувалася для процесу горіння вуглеводневих речовин у повітрі. Для перевірки працездатності використовуваної моделі під час дослідження процесів спалювання та газифікації раніше були виконані розрахунки горіння метану (CH_4) [54] і етилового спирту (брутто-формула C_2H_6O) [5]. До складу повітря в кількості $\sim 1\%$ крім O_2 і N_2 входять домішки інших газів. Вони не беруть участі в процесі окиснення, є інертними у процесі горіння. Для зменшення громіздкості в розрахунках їх замінено на N_2 . В результаті цього склад повітря прийнятий:

$$21\% - O_2, 79\% - N_2$$

Розрахунки виконані для різних величин коефіцієнта надлишку окиснювача α . За $\alpha = 1$ процес розглядався як спалювання. За $\alpha < 1$ — як газифікація. Проведено порівняння результатів розрахунків за запропонованою моделлю і даних з [54] при спалюванні в повітрі метану [55] і етилового спирту [5]. Наведено величини температури T (K) і парціальних тисків P_i (в барах) продуктів згоряння при тиску в

камері згоряння (топці) 1 бар. Порівняння проведено для різних значень α шляхом визначення відносної похибки ε обчислень парціальних тисків щодо тиску в камері згоряння. Величина мінімальних приведених значень α обумовлена наявністю даних в [55]. На підставі використовуваної моделі розрахунки можуть бути виконані за будь-якого значення α .

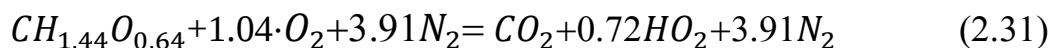
Отримані в [54] і [5] результати показують хороший збіг результатів розрахунку за запропонованою моделлю і наведених в [55]. Відносні похибки визначення парціальних тисків під час спалювання метану не перевищують 1 %, а для етилового спирту – 1,4 %, і не перевищують допустимих для інженерних розрахунків величин (<5 %). Частина отриманої похибки може бути обумовлена використанням у розрахунках наближеного складу повітря.

Для оцінки достовірності моделі, використовуваної в рішенні завдання термохімічних перетворень твердих речовин, за всього різноманіття експериментальних робіт не вдалося знайти структурованих даних. Замість них використані експериментальні значення діапазонів зміни концентрацій основних груп продуктів перетворень для вихідної деревної сировини з соломи. Такі дані є в більшості доступних літературних джерел різних років. Цим і зумовлений їхній вибір.

Використовувані в розрахунках складу брутто-формули і ентальпія вихідної речовини (соломи пшениці) визначені на основі непрямих даних. Величини цих даних в різних джерелах близькі, але неоднакові, і наводяться в деякому діапазоні. З цієї причини конкретне джерело їхніх значень не вказано. Прийнято, що до складу пшеничної соломи входять: C – 49–50 %; O – 42–44 %; H – 6–7 %. Крім того до складу соломи входять $\sim 0,1$ –1 % N і до 1 % мінеральних компонентів (зольність). Ці речовини не враховуються через малу величину їх концентрацій при оціночному характері розрахунків. У результаті в якості брутто-формули вихідної сировини прийнята $CH_{1,44}O_{0,64}$. Жаропродуктивність абсолютно сухої соломи пшениці в деяких джерелах вказана на рівні 1500 °C (1230 K), що дозволило оцінити ентальпію вихідної сировини величиною 68,24 кДж/моль (2880 кДж/кг).

Процес горіння за стехіометричного співвідношення пального і окиснювача ($\alpha = 1$) у спрощеному варіанті розглядається як процес повного окиснення горючих

речовин. Для соломи пшениці це виглядає так:



Результати розрахунку цього процесу на основі запропонованої моделі відображені у відповідному рядку в табл. 2.2. Як і раніше, тиск продуктів горіння в камері згоряння (топці) прийнято $P_{\Sigma} = 1$ бар.

Перелік продуктів згоряння, відображений в табл. 2.2, ширший за аналогічний перелік в (2.21). Проте ці дані можна співставити, якщо знайти кількість продуктів, які містять H і N , що припадають на 1 моль речовин, що містять:

$$\frac{P_{H_2O} + P_{OH} + P_{H_2}}{P_{CO} + P_{CO_2}} = \frac{0.121 + 0.004 + 0.03}{0.019 + 0.156} = 0.713, \quad (2.32)$$

$$\frac{P_{N_2} + P_{NO}}{P_{CO} + P_{CO_2}} = \frac{0.684 + 0.003}{0.019 + 0.156} = 3.926, \quad (2.33)$$

Відхилення результатів (2.36), (2.37) від величин з (2.21) (кількість молів H_2O і N_2) не перевищує 1,5 %, при цьому вони є більш інформативними. Результати розрахунків (табл. 2.2) відображають основні особливості процесів горіння і газифікації.

Таблиця 2.2

Температура і концентрації (парціальні тиски, об'ємні частки) продуктів горіння соломи пшениці за різних значень коефіцієнта надлишку окиснювача α

α	T, K	Концентрації (парціальні тиски, бар) продуктів реакції							
		CO	CO_2	H_2O	OH	H_2	N_2	O_2	NO
2,5	1409	0	0,077	0,055	0	0	0,749	0,119	0
2,2	1530	0	0,086	0,062	0	0	0,743	0,107	0
1,9	1681	0	0,099	0,071	0	0	0,736	0,092	0,0017
1,6	1870	0,0001	0,116	0,083	0	0	0,723	0,071	0,0028
1,3	2119	0,0015	0,139	0,100	0,002	0,0003	0,711	0,042	0,0043
1	2356	0,019	0,156	0,121	0,004	0,003	0,684	0,008	0,003

продовження табл. 2.2

0,9	2371	0,040	0,150	0,128	0,003	0,007	0,667	0,002	0,0016
0,8	2316	0,072	0,134	0,132	0,0015	0,015	0,644	0	0
0,6	2071	0,153	0,093	0,125	0	0,052	0,577	0	0
0,4	1661	0,246	0,058	0,085	0	0,134	0,476	0	0
0,3	1348	0,303	0,043	0,048	0	0,201	0,406	0	0

Так, температура продуктів реакції показана більшою для $\alpha = 0,9$ порівняно з $\alpha = 1,0$. Це зумовлено великим впливом збільшення баласту у вигляді N_2 порівняно зі збільшенням отриманої енергії у формі тепла. Цей газ необхідно нагріти, а в реакції він не бере участі. Результати розрахунків адекватно відображають зміну співвідношення CO , CO_2 і H_2O в міру зміни α , за переходу від спалювання до газифікації. Відображено збільшення кількості оксидів азоту в міру збільшення вільного O_2 з ростом α . Починаючи з деякого значення α відбувається зменшення кількості NO , незважаючи на збільшення O_2 , що триває в продуктах реакції. Це обумовлено зниженням їхньої температури.

Подальше, порівняно з наведеними в табл. 2.2, зменшення значення величини α веде до неможливості організації процесу спалювання (газифікації). За $\alpha = 0$ і нагрівання вуглеводневої сировини відбувається його суха перегонка (повільний піроліз). Результати розрахунку параметрів цього процесу на основі запропонованої моделі наведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Масові частки (m_i) продуктів піролізу соломи пшениці за різних значень температури (Т)

T, K	CO	CO ₂	H ₂ O	CH ₄	H ₂	U
700	0,003	0,288	0,246	0,112	0,005	0,34
900	0,102	0,294	0,178	0,05	0,028	0,343
1100	0,490	0,125	0,067	0,06	0,051	0,255
1300	0,707	0,019	0,014	0,001	0,059	0,195
1500	0,744	0,003	0,003	0	0,060	0,184

В експериментальних дослідженнях низькотемпературного (350–450°C) повільного піролізу деревини відзначається утворення вуглеводневих речовин, що конденсуються – рідкої фази: оцтової кислоти, смол і ін. Це результат відносно швидкого видалення продуктів розкладання із зони нагріву. Високомолекулярні стійкі до термічної деструкції летючі вуглеводневі речовини не встигають розкластися до простих. Яскравіше цей ефект проявляється в процесах швидкого піролізу. За підвищення температури повільного піролізу або збільшення часу перебування продуктів реакції в зоні нагріву кількість речовин, що конденсуються, зменшується аж до повного зникнення. У табл. 2.3 представлені результати розрахунку параметрів саме такого процесу. З цієї причини в переліку продуктів реакції відсутні вуглеводневі речовини, крім метану. Розгляд на основі запропонованої моделі процесів швидкого піролізу з утворенням великої кількості конденсованих речовин буде предметом додаткових досліджень. У літературних джерелах для повільного піролізу склад продуктів реакції вказується в масових частках (m_i). У табл. 2.3 для відображення результатів розрахунків використані ці самі величини.

Для оцінки адекватності отриманих результатів скористаємося основними характеристиками повільного і високотемпературного піролізу з табл. 2.4, наведеними в (3.13)

Таблиця 2.4

Характеристики видів піролізу

Процес	Умови	Продукти, % мас.		
		Дистилят	Вугілля	Газ
Повільний піроліз	Низька температура (350–450 °C), тривалий процес	30 (вод идо 75 %)	35	35
Високо-температурний піроліз	Висока температура(>600 °C)	5 (смоли)	10	85

Повільному піролізу (табл. 2.4) відповідають результати розрахунку (табл. 3.2) за температури $T = 700 \text{ K}$. Відносна похибка розрахованої частки вугілля в 34 % відрізняється від експериментальних даних не більше ніж на 3 %. Похибка розрахунку частки води ще менша, і становить $\sim 1,5 \%$. Для високотемпературного піролізу відмінність розрахункових значень більша, але також не суперечить характеру даних. При цьому треба врахувати, що експериментальні дані наведені для деякого діапазону умов. Розрахункові величини визначаються для фіксованого значення температури.

Отже, результати розрахунків, виконані з використанням пропонованої єдиної моделі, адекватно відображають параметри різних процесів термохімічної конверсії вуглеводневих речовин: спалювання, газифікації, повільного піролізу. Відносна похибка обчислень не виходить за межі допустимих значень для інженерних розрахунків ($<5 \%$).

2.4 Модель піролізного реактора як об'єкта управління

У відомих джерелах при розгляді процесів фільтраційного горіння в наададіабатичному режимі спираються на побудову макрокінетичних моделей [55]. У той же час зазначається [58, 50], що за малих швидкостей компонентів реалізуються

процеси їх перетворення, близькі до рівноважних. Розрахунки на основі рівноважних моделей будуються з урахуванням усіх потоків ентальпії. Зокрема повинні враховуватися теплові втрати через стінки реактора в навколишнє середовище. Розрахунок теплових потоків, що при цьому виникають від центральної зони реактора до його периферії, повинні будуватися з урахуванням зміни теплофізичних характеристик шихти в процесі її термохімічних перетворень. Методи розрахунку таких характеристик існують [59], але вони складні в застосуванні. В силу малих втрат порівняно з тепловими потоками, що виникають у процесі розглянутих реакцій, відмовляються від їх врахування під час побудови моделей рівноважних процесів. Більш того, втрати через стінки реактора можуть бути зменшені за рахунок застосування теплоізоляції або навіть виключені у разі застосування заходів, описаних в патенті [60].

Визначення області дослідження як «фільтраційне горіння» в більшості відомих джерел передбачає розгляд реакцій, що протікають як процес окиснення шихти киснем повітря. До того ж, ці екзотермічні реакції розглядаються як джерело теплової енергії для підтримки процесу горіння. В [58] розглядається можливість присутності в якості ендотермічних окиснювачів водяної пари і діоксиду вуглецю, але кисень повітря залишається основним окиснювачем. В цьому випадку кисень повітря як окиснювач необхідний як повільному піролізу (табл. 2.4) відповідають результати розрахунку (табл. 3.2) за температури $T = 700 \text{ K}$. Відносна похибка розрахованої частки вугілля в 34 % відрізняється від експериментальних даних не більше ніж на 3 %. Похибка розрахунку частки води ще менша, і становить $\sim 1,5 \%$. Для високо-температурного піролізу відмінність розрахункових значень більша, але також не суперечить характеру даних. При цьому треба врахувати, що експериментальні дані наведені для деякого діапазону умов. Розрахункові величини визначаються для фіксованого значення температури.

Отже, результати розрахунків, виконані з використанням пропонованої єдиної моделі, адекватно відображають параметри різних процесів термохімічної конверсії вуглеводневих речовин: спалювання, газифікації, повільного піролізу. Відносна похибка обчислень не виходить за межі допустимих значень для інженерних

розрахунків (<5 %).

У відомих джерелах при розгляді процесів фільтраційного горіння в нададіабатичному режимі спираються на побудову макрокінетичних моделей [55]. У той же час зазначається [58, 59], що за малих швидкостей компонентів реалізуються процеси їх перетворення, близькі до рівноважних. Розрахунки на основі рівноважних моделей будуються з урахуванням усіх потоків ентальпії. Зокрема повинні враховуватися теплові втрати через стінки реактора в навколишнє середовище. Розрахунок теплових потоків, що при цьому виникають від центральної зони реактора до його периферії, повинні будуватися з урахуванням зміни теплофізичних характеристик шихти в процесі її термохімічних перетворень. Методи розрахунку таких характеристик існують [56], але вони складні в застосуванні. В силу малих втрат порівняно з тепловими потоками, що виникають у процесі розглянутих реакцій, відмовляються від їх врахування під час побудови моделей рівноважних процесів. Більш того, втрати через стінки реактора можуть бути зменшені за рахунок застосування теплоізоляції або навіть виключені у разі застосування заходів, описаних в патенті [60].

Визначення області дослідження як «фільтраційне горіння» в більшості відомих джерел передбачає розгляд реакцій, що протікають як процес окиснення шихти киснем повітря. До того ж, ці екзотермічні реакції розглядаються як джерело теплової енергії для підтримки процесу горіння. В [58] розглядається можливість присутності в якості ендотермічних окиснювачів водяної пари і діоксиду вуглецю, але кисень повітря залишається основним окиснювачем. В цьому випадку кисень повітря як окиснювач необхідний як реагент, джерело теплової енергії. яке підтримує екзотермічну реакцію

У разі використання в якості вихідної сировини органічних речовин може існувати й інше джерело теплової енергії. Для визначеності розглянемо солому пшениці. Такий вибір обумовлений доступністю її фізико-хімічних якостей. Можливість використання горючих речовин змінного і невідомого складу буде розглянута нижче. У відомих джерелах при розгляді піролізу соломи в процесі її

нагрівання виділяється кілька стадій з позначенням їх температурних меж і направлення відповідних енергетичних потоків [61]:

- до температури $\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ зі споживанням енергії – сушка сировини;
- до температури $\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в деяких джерелах $\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$) зі споживанням енергії;
- початкове розкладання з виділенням газоподібних продуктів і початком обвуглювання;
- за подальшого нагріву – стрімкий розклад сировини з виділенням великої кількості енергії.

Теплова енергія, що виділяється на останній стадії, може бути використана для розігріву шихти в нададіабатичному режимі.

У зоні окиснення, де є різні температури відбувається реакція вуглецевого залишку з киснем, парами води і діоксидом вуглецю з утворенням водню і оксиду вуглецю [55]

У зоні закалки відбувається охолодження твердого залишку, що подається окиснювачем з одночасним нагріванням останнього. Згідно з такою схемою пари води спільно з киснем і діоксидом вуглецю виступають в якості окиснювача, що діє в напрямку збільшення енергетичної цінності і обсягу продукт-газу при одночасному зменшенні вуглистого залишку. Але надходження в зону окиснення зневодненої вихідної сировини зменшує кількість водню, що утворюється. Це є одним із недоліків розглянутої схеми газифікації. В деяких випадках для збільшення частки складових $\text{CO} + \text{H}_2$ (синтез-газ) у складі продукт-газу в дутті (окиснювач) додають пари води, що супроводжується збільшенням витрат енергії на здійснення процесу. Враховуючи описані особливості процесу, пристрій, що працює за таким принципом, можна позиціонувати як реактор для спалювання різної, зокрема й малоенергетичної сировини з попутним утворенням певної кількості горючих газів

З метою збільшення теплотворної здатності та обсягу горючих газів, що утворюються під час піролізу (газифікації) пропонується інша схема руху шихти і газових потоків. Відповідно до схеми процесу, зображеної на рис. 2.1, теплова енергія виділяється в зоні окиснення. У межах цієї схеми енергія, що виділяється,

використовується для сушки і видаляється із зони реакції. Ідея нової схеми процесу полягає в сушінні і нагріванні вихідної сировини також продуктами реакції після зони окиснення, але в супутньому потоці. Для цього частину продуктів реакції (продукт-газу) за високої їх температури подається на вхід камери разом з вихідною сировиною. Далі вони рухаються в одному напрямку. В результаті продукти сушки і початкового розкладу надходять у зону окиснення. Разом з ними вноситься і енергія, яка використовується для їх утворення. Якщо в частині продукт-газу, який подається на вхід реактора, по рециркуляційній лінії буде достатньо енергії для сушіння й нагрівання вихідної сировини до кінцевої температури зони попереднього піролізу (300–400 °C), почнеться зона виділення енергії і саморозкладу соломи. Вона збігається з зоною окиснювальних процесів, які відбуваються за рахунок кисню з CO_2 і H_2O і відновленням останніх до CO і H_2 . У разі нестачі енергії і за необхідності підвищення температури продукт-газу на виході з реактора на його вході може подаватися необхідна кількість окиснювача (повітря).

Хіміко-термічні процеси охарактеризовані граничними (рівноважними) параметрами, в межах яких вони здійснені. Ці параметри грають роль своєрідного ідеального ККД процесу. Саме таку роль відіграють наведені нижче результати розрахунків.

В рамках процесу повільного піролізу, особливо високотемпературного, склад продуктів реакції визначається не тільки хімічним складом вихідної органічної речовини, але і його вологістю. У таких процесах кількість хімічно зв'язаної води в початкових продуктах впливає на склад продуктів реакції. Використання єдиної моделі для режимів піролізу і газифікації (за додавання повітря в якості окиснювача) вимагає і єдиного підходу до опису складу вихідної сировини у всіх розглянутих випадках. Виходячи з цих особливостей, вихідна сировина розглядається як однорідна речовина, брутто-формула якої залежить від кількості води в її складі і витрати повітря.

Для демонстрації працездатності пропонованої моделі в якості вихідної органічної речовини прийнята абсолютно суха солома пшениці з брутто-формулою $CH_{1.18}O_{0.82}$. Вода враховується як молярна частка φ у складі соломи. Наприклад, за φ

= 0,1 для 0,9 моль соломи береться 0,1 моль води. В цьому випадку результуючий 1 моль вихідної речовини має брутто-формулу $CH_{1.18}O_{0.82}$. Додавання повітря впливає на зміну брутто-формули сировини аналогічно і враховується як молярна частка α від складу соломи з уже доданою водою. Для спрощення розрахунків склад повітря приймається як суміш кисню (21%) і азоту (79%) з брутто-формулою $O_{0.42}N_{1.58}$. Так, наприклад, за додавання $\alpha = 0,1$ повітря для $C_{5.04}O_{0.681}N_{0.008}$ (солома + $\varphi = 0,1$ води) брутто-формула вихідної сировини матиме вигляд: $C_{0.006}O_{0.595}N_{0.528}$. У процесі розрахунку визначається температура рівноважної суміші продуктів реакції, за якої її ентальпія дорівнює ентальпії вихідної речовини.

В [55] зазначено, що в зоні окиснення температура становить 1000–1200 °С. Тому і у виконаних розрахунках температура в зоні рівноважних реакцій розглядалася до величини 1500 К. При цьому модель, що застосовується, таких обмежень не накладає. Результати розрахунків рівноважних температур за різних поєднань ступеня зволоженості вихідної сировини (φ) і кількості повітря, що подається (α), наведені в табл. 2.1. Отримані значення показують, що за використання запропонованої схеми температури у зоні окиснення можуть досягати величин, що відповідають значенням в роботі [55] без подачі повітря або за малої його кількості. Так, за $\alpha = 0$ (без повітря) і $\varphi = 0,4$ отримано $T = 1380$ К (~ 1100 °С), а за $\alpha = 0,1$ і $\varphi = 0,4$ $T = 1420$ К (~ 1150 °С).

Особливістю пропонованої схеми (рис. 2.2) є необхідність витрат значної кількості енергії для попередньої підготовки сировини. З цією метою пропонується використовувати енергію частини продуктів реакції шляхом регенеративного нагріву з їх допомогою вихідної сировини до температури початку мимовільної реакції [62]. Для соломи ця температура становить ~ 400 °С. Для значень α і φ , наведених в табл. 3.4, були виконані розрахунки з визначення енергії при охолодженні продуктів реакції до температури ~ 400 °С (~ 670 К) і енергії, необхідної для нагріву вихідної сировини до цієї ж температури.

Враховувалася енергія, необхідна для нагрівання соломи, повітря, води до 100 °С, її випаровування і нагріву утвореної пари. Результати розрахунку наведені в таблиці 2.5 у вигляді величини, рівної відношенню необхідної енергії до наявної. Ці

величини показують, якої частини продуктів реакції достатньо для її підтримки.

Таблиця 2.5

Результати розрахунків з визначення енергії

φ	α			
	0,7	0,8	0,9	1,0
0	1020	1095	1170	1310
0,1	1090	1140	1260	1500
0,2	1160	1340	1415	
0,3	1240	1380		
0,4	1380	1420		

Ще однією характеристикою описаного процесу піролізу може бути величина вуглистого залишку. Використання різних окиснювачів для його зменшення істотно впливає на енергетичну цінність продуктів реакції. Кисень повітря підвищує температуру в реакційній зоні і зміщує реакцію в рівноважну область. Проте при цьому збільшується ступінь окиснення продуктів реакції і падає їхня енергетична цінність. Використання водяної пари підвищує вміст у продуктах реакції компонентів синтез-газу і, відповідно, збільшує реакційну і енергетичну цінність продуктів реакції. Але така реакція вимагає великих енерговитрат, про що свідчать дані у таблиці 2.2. Водночас ці дані показують можливість перебігу подібної реакції без використання кисню повітря або за малої його кількості.

Таблиця 2.6

Результати розрахунків відношення необхідної енергії до наявної

φ	α			
0	0,67	0,61	0,55	0,44
0,1	0,82	0,73	0,58	0,41
0,2	0,88	0,61	0,53	
0,3	0,89	0,65		
0,4	0,77	0,68		

Таким чином, можна зробити висновок про вигідність використання водяної пари в піролізній установці, що використовує солому в якості сировини, у випадку якщо установка призначена для отримання синтез-газу. Слід зазначити, що природа сировини в такому випадку може бути джерелом вологи само по собі, у випадку відсутності попередньої технологічної фази сушіння соломи. Тобто, якщо солома буде сушитися в самій піролізній установці, то водяна пара, що в ній міститься, буде позитивно впливати як на кількість утвореного синтез газу, так і на його якість – теплотворну здатність. Таким чином, запропонована схема установки фактично перетворює недоліки використання вологої соломи у додаткову перевагу – спрощення технологічного процесу за рахунок відсутності фази сушіння соломи, і збільшення кількості і якості утвореного синтез-газу.

Наведені дані показують можливість повного окиснення вуглистою залишку вологої вихідної речовини без кисню повітря або за мінімальної його кількості. Результати розрахунків у табл. 2.5-2.7 отримані для речовини з брутто-формулами, приведеними в табл. 2.8.

Таблиця 2.7

Брутто-формули речовини для розрахунків

ϕ	α			
	0	0,1	0,2	0,3
0	$\text{CH}_{1,44}\text{O}_{0,64}\text{N}_{0,009}$	$\text{CH}_{0,962}\text{O}_{0,567}\text{N}_{0,531}$	$\text{CH}_{0,722}\text{O}_{0,530}\text{N}_{0,792}$	$\text{CH}_{0,578}\text{O}_{0,508}\text{N}_{0,950}$
0,1	$\text{CH}_{1,504}\text{O}_{0,681}\text{N}_{0,008}$	$\text{CH}_{1,006}\text{O}_{0,595}\text{N}_{0,528}$	$\text{CH}_{0,756}\text{O}_{0,551}\text{N}_{0,790}$	$\text{CH}_{0,605}\text{O}_{0,525}\text{N}_{0,948}$
0,2	$\text{CH}_{1,556}\text{O}_{0,714}\text{N}_{0,007}$	$\text{CH}_{1,042}\text{O}_{0,617}\text{N}_{0,527}$	$\text{CH}_{0,783}\text{O}_{0,568}\text{N}_{0,788}$	
0,3	$\text{CH}_{1,6}\text{O}_{0,743}\text{N}_{0,0064}$	$\text{CH}_{1,073}\text{O}_{0,637}\text{N}_{0,525}$		
0,4	$\text{CH}_{1,634}\text{O}_{0,765}\text{N}_{0,0059}$	$\text{CH}_{1,097}\text{O}_{0,652}\text{N}_{0,524}$		

Усі зазначені раніше розрахунки виконувалися в припущенні відомого складу і ентальпії вихідної сировини. Як правило, в реальних умовах ці дані невідомі. Більш того, склад речовин, що переробляються, може змінюватися в часі. Для можливості переробки органічних речовин змінного складу пропонується піролізна установка, принципова схема якої приведена на рис. 2.3. Така установка повинна дозволити:

- на стаціонарній стадії роботи за відомого складу сировини, що переробляється, повністю газифікувати її органічну складову за умови розрахунку мінімально необхідної кількості повітря та регулювання його подачі;
- в процесі роботи відслідковувати склад вихідної речовини та за його зміни переходити у режим його визначення;
- на перехідних режимах, зі зміною складу вихідної речовини, зокрема під час запуску установки, визначати поточний склад вихідної речовини та його ентальпію.

Побудова основної частини установки – реактора ІІІ – відповідає схемі див. рис. 2.3. Принцип роботи і величини деяких параметрів для стаціонарного режиму роботи відповідають описаним вище. Через колектор І з витратою G_1 на вхід в реактор подається вихідна сировина.

Через колектор ІІ на виході з реактора з витратою Q_2 в загальну систему надходить гарячий продукт-газ, і розділяється на два потоки з витратами: Q_4

У разі фіксації зміни складу продукт-газу установка з режиму газифікації переводиться в режим горіння. Це виражається в збільшенні подачі повітря через

колектор IV з метою гарантованого перетворення вихідної сировини зі зміненим невідомим складом в газоподібні продукти. Далі в пристрої VII (рис. 2.3) визначається їхня брутто-формула і, відповідно, новий склад вихідної сировини. Далі на підставі цих даних установка переводиться в режим піролізу (газифікації) шляхом регулювання подачі повітря відповідно до нового складу шихти.

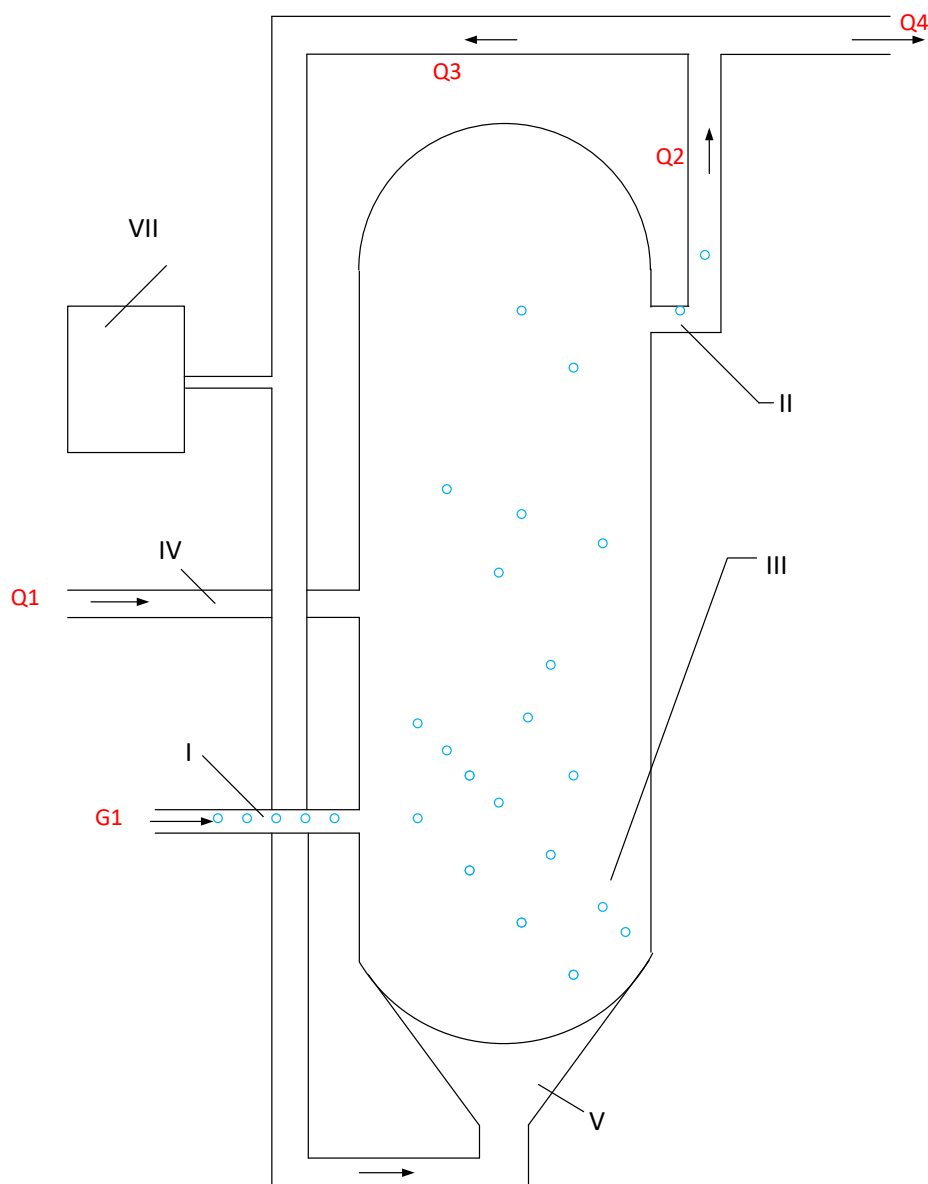


Рис. 2.3. Схема піролізної установки

По рециркуляційній лінії на вхід V у реактор для сушки і нагріву вихідної сировини. Через колектор IV подається необхідна кількість повітря з витратою Q1.

За стаціонарного режиму роботи і повної газифікації органічною складовою вихідної сировини брутто- формула продукт-газу відповідає брутто-формулі вихідної сировини. Склад продукт-газу i , відповідно, його сталість контролюється за допомогою пристрою VII. Його робота побудована на основі методу [2] визначення брутто-формули суміші горючих газів у процесі їх спалювання в спеціальному пристрої [3]. Для цього достатньо заміряти витрати газової суміші, повітря і відпрацьованих газів в цьому пристрої за різних витрат суміші. До складу газової суміші можуть входити і негорючі гази

На основі наведеного вище опису піролізної установки була розроблена імітаційна математична модель, яка описує динамічні властивості апарату за такими каналами:

- витрати повітря Q_1 – витрати продукт-газу Q_2 ;
- витрати вихідної сировини G_1 – витрати продукт-газу Q_2 ;
- витрати рециркуляційного газу Q_3 – витрати продукт-газу Q_2 ;
- витрати повітря Q_1
- температура піролізу t ;
- витрати вихідної сировини G_1 – температура піролізу t ;
- витрати рециркуляційного газу Q_3 – температура піролізу t ;
- витрати повітря Q_1 — склад продукт-газу Q_H^P

Параметрична схема регулювання апарату наведена на рис. 2.5.

Динамічні властивості апарату, що регулюється за вказаними каналами, отримані, виходячи з розгляду законів збереження маси та енергії, а також математичної моделі, викладеної в п. 3.1. По каналах « $Q_1 - Q_2$ », « $G_1 - Q_2$ », « $Q_1 - t$ », « $G_1 - t$ » « $Q_3 - t$ » цей апарат є інерційною ланкою першого порядку. Взаємозв'язки між вхідними та вихідними параметрами регульованого апарата представлені у вигляді таблиці передавальних функцій.

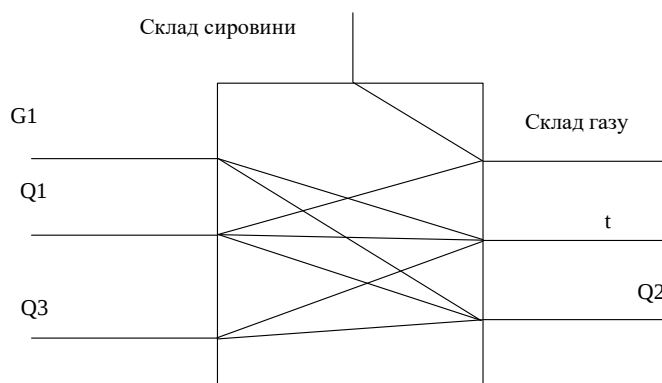


Рис. 2.5. Параметрична схема піролізної установки першого порядку з запізненням.

Коефіцієнти передавальних функцій були визначені з розрахунку процесу піролізу, та з урахуванням теплових потоків за допомогою методу, описаного в [10], наведенні в табл. 2.9.

Таблиця 2.8

Передавальні функції вхідних та вихідних параметрів

	Витрати повітря Q_1 , моль/с 50	Витрати вихідної сировини G_1 , моль/с	Витрати рециркуля- ційного газу Q_3 , моль/с 70	Теплотворна Здатність сировини, Q_H^P
Витрати продукт- газу Q_2 , моль/с	$W(s) = \frac{1}{T_1 s + 1} e^{-\tau s}$	$W(s) = \frac{1}{T_2 s + 1} e^{-\tau s}$	$W(s) = \frac{1.83}{T_3 s + 1} e^{-\tau s}$	—
Температур апіролізу t , С	$W(s) = \frac{600}{T_1 s + 1} e^{-\tau s}$	$W(s) = \frac{300}{T_2 s + 1} e^{-\tau s}$	—	—

продовження табл. 2.8

Теплотворна здатність продукту-газу Q_H^P	$W(s) = \frac{k}{T_1 s + 1} e^{-\tau s}$	—	—	$W(s) = \frac{1}{T_4 s + 1} e^{-\tau s}$
---	--	---	---	--

Сталі часу і величини запізнювання визначаються геометричними розмірами апарата, тому повинні уточнюватися індивідуально для кожної установки. На цьому етапі прийняті $T_1 = 50$ с, $T_2 = 50$ с, $T_3 = 70$ с, $T_4 = 40$ с, $\tau = 5$ с.

Оскільки брутто-формула продукту-газу збігається з брутто-формулою вихідної сировини і залежить від кількості повітря, що подається, то, відповідно, склад продукту-газу визначається складом вихідної сировини і витратою повітря. В якості параметру, що характеризує склад продукту-газу, обрана його теплотворна здатність.

2.5 Вплив змін складу відходів агротехнологій на динамічні характеристики об'єкта управління

Як було показано вище, склад відходів агротехнологій, щодо яких здійснюється піроліз в реакторі – змінний. Наявність таких змін має своїм наслідком зміни в динамічній поведінці реактора – так, наприклад, коефіцієнти підсилення та сталі часу в ланках температури піролізу будуть змінюватися. Джерелами таких змін є, по-перше, зміна якості синтезу газу, що зумовлює зміну теплового потоку, а також зміна теплоємності речовини, що проходить процес піролізу [65]. Наявність такої проблеми вимагає внесення змін до моделі, описаній в таблиці 2.9. Враховуючи те, що такі зміни важко піддаються прогнозуванню, запропоновано в рамках вирішення задачі данної роботи симулювати зміни на вхід Q^P , моделі подавати сигнал збурення в визначених межах.

2.6 Висновки до другого розділу

1. Розроблено модель керування процесом піролізу, засновану на пропорційному законі керування, яка включає в себе інформацію про склад соломи, що проходить процес піролізу
2. Визначено властивості моделі необхідні для подальшого розв'язання задачі керування
3. Побудовано модель нечіткої кластеризації та класифікації виду соломи за її бруто формулою, яка дозволяє обрати найкращу температуру піролізу, що забезпечує найвищу теплотворну здатність синтез-газу.
4. Побудовано модель процесу піролізу біомаси, що заснована на використанні законів хімічної кінетики, збереження речовини і балансу максимальних валентностей окислювальних та відновних
5. Побудовано модель піролізної установки як об'єкта управління у вигляді таблиці передатних функцій.

РОЗДІЛ 3. СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПІРОЛІЗНИМ РЕАКТОРОМ

У цьому розділі синтезовано систему керування піролізним реактором, що компенсує збурення складу відходів агротехнологій у визначених межах.

У третьому розділі вирішені такі завдання:

- Визначення найкращого методу вирішення задачі керування.
- Розробка загальної структури АСК, та її окремих вузлів.
- Розробка методу компенсації збурення складу відходів агротехнологій;
- Перевірка стійкості отриманої системи керування.
- Моделювання синтезованої системи.

3.1 Визначення методів вирішення задачі керування.

Загалом метод вирішення задачі управління визначається структурою, природою і поведінкою об'єкта управління. У випадку лінійності або задовільної лінеаризації об'єкта управління доцільно використання класичних ПП, ППД, чи ПД регуляторів через їх відносну простоту і високу точність за наведених умов. За умов можливості безпосереднього визначення, чи задовільного оцінювання змінних внутрішнього стану ОУ доцільно використовувати добре вивчені методи синтезу систем управління за станом, як лінійно квадратичне керування, метод розміщення полюсів, та їх похідні. У випадку існування істотних нелінійностей в ОУ, та за можливості виконання серії дослідів безпосередньо на ОУ, чи за наявності задовільної моделі можливе використання нейронних мереж, чи нечіткої логіки. З іншого боку – нелінійність ОУ можливо обійти шляхом реалізації серії класичних лінійних регуляторів, чи іншими методами адаптивного керування за умови існування еталонної моделі. Існуюча модель описана в попередній главі, вид закону управління (2.8) а також умови за яких даний закон може бути реалізований для даного ОУ, а саме наявність інформації про склад біомаси, що піролізується визначає такі особливості загальної системи:

1. Нелінійність ОУ – як видно з моделі заданою таблицею передатніх функцій, основним джерелом нелінійності є транспортні затримки.

2. Існування двох окремих задач – задачі управління піролізним реактором, і задачі визначення складу біомаси.

3. Зміна властивостей ОУ в часі, нестационарність моделі

4. Відомі загальні принципи поведінки об'єкта управління, тобто наявність експертних знань.

Зважаючи на наявність двох задач, є сенс розглядати їх окремо. Задача визначення складу біомаси вирішена в попередній главі, проте як було зазначено – для імплементації описаного алгоритму необхідне досягнення значення коефіцієнту надлишку окисника рівному одиниці, і як було показано, індикатором досягнення такого значення є досягнення екстремуму(максимуму) температури. Отже, з метою уможливлення роботи алгоритму необхідно синтезувати систему управління горінням в описаному попередньо тестовому реакторі, що забезпечує температурний максимум. Для вирішення цієї задачі доцільно використати екстремальний регулятор. З іншого боку, як було показано в попередній главі – задача забезпечення максимуму тепловтвірної здатності синтез-газу зводиться до забезпечення певних значень параметрів витрат окисника, синтез газу поданого на реверс, та витрат біомаси. Іншими словами, задача зводиться до класичної задачі управління за помилкою, при наявності адекватного джерела оновлення завдань регулятора. Метод реалізації системи керування було обрано з наступних міркувань.

МРС регулятор [60]. Загалом демонструє хороше керування, але має постійно працювати з моделлю, що не є надійно.

На сьогоднішній день теорії автоматичного керування відомі такі методи побудови регуляторів, як П, ПІ, ПД, ПІД регулювання, управління за станом методом розміщення полюсів, лінійно-квадратичного програмування, нечіткі ПІД регулятори, регулювання засноване на штучних нейромережах, а також різноманітні варіації і комбінації цих методів. Однак специфіка керування піролізом біомаси накладає певні обмеження на доцільність використання деяких методів. Так, наприклад, в роботі [67] було здійснено покращення якості керування шляхом використання нечіткого ПІД

регулятора, замість класичного ПД регулювання при побудові системи керування установки мікрохвильового піролізу біомаси. Покращення відбулось за рахунок побудови функцій приналежності термів температури реактора, що враховують його нелінійну та нестаціонарну природу. Таким чином було досягнуто зменшення енергії активації мікрохвильового піролізу кукурудзяного корму, лігніну, целюлози та геміцелюлози приблизно на 15,2%, 17,3%, 19,9% та 11,8% відповідно. Іншими методами врахування нелінійностей піролізного реактора є використання прогнозуючої моделі, як показано в [68]. В даній роботі з використанням експериментальних даних було побудовано нечітку модель станів піролізного реактора, що дозволило застосування адаптивного керування за вектором станів. В свою чергу, це дозволило значно покращити середньоквадратичне відхилення регульованих величин в порівнянні з класичним ПІ регулятором. Іншим напрямом в керуванні піролізними установками є використання нейронних штучних нейромереж. Так, в роботі [69], таку мережу з оптимізацією за допомогою ройових алгоритмів. Це дозволило отримати систему з високою робастністю, і показником точності керування в усіх режимах вище за 0.97. Однак, слід зазначити, що модель розроблена в [69] в якості вхідних даних приймає точно виміряні складові біомаси, що вимагає певних додаткових обчислювальних, технологічних та навіть організаційних заходів, як організація вимірювання масових часток відходів агропромислового комплексу й їх зважене усереднення при навчанні моделі на реакторі з новою конфігурацією.

Окремо слід розглянути методи керування за допомогою класичних нейромереж. Наприклад, в роботах [70], [71], [72], розроблено класичні нейронні мережі для вирішення задачі керування. З одного боку, отримані системи демонструють надзвичайно високі показники якості керування, але з іншого, для забезпечення їх високої працездатності необхідне проведення екстенсивних експериментальних досліджень піролізу різних видів і сумішей рослинної біомаси. Іншим недоліком таких систем є їх загальна технічна складність, і серед ризиків для таких систем є потенційно недостатня швидкість проведення складних обчислень процесором. Також такі недоліки властиві і нечітким нейронним мережам. З метою пом'якшення таких недоліків в роботі [67], запропоновано використання ПЛІС для

В першу чергу, слід відзначити наявність двох окремих ОУ у системі - піролізний реактор, та тестовий реактор, що являє собою ізоентальпійний пристрій описаний в третьому розділі попередньої глави. На структурній схемі також присутні обчислювальні блоки, що позначають обчислення мутацій функцій приналежності, обчислення умовної формули, нечіткий регулятор, множник K_a , суматор, блок обчислення задач для нечіткого регулятора, екстремальний регулятор. Стрілки між обчислювальними блоками позначають напрям і вид потоку даних між логічними частинами програмно-апаратного комплексу. Нечіткий регулятор (Мамдані) виконує, власне, керування піролізним реактором відповідно до задаючих впливів отриманих з блоку обчислення задач регулятора. Синтез газ $G1H$ з реактора є виходом системи, причому частина газу подається на вхід реактору, а інша частина – в ізоентальпійний пристрій – тестовий реактор, в якому виконується згорання газу. Екстремальний регулятор забезпечує максимум температури горіння шляхом зміни витрат окисника Q_3 , а відтак – забезпечує необхідну в подальшому величину коефіцієнта надлишку окисника рівну 1. Блок обчислення умовної формули реалізовує алгоритм описаний в третьому розділі попередньої глави, вирішує систему рівнянь (2.10)-(2.20), і видає обчислений склад у вигляді кортежу x, y, z , де x, y, z – відповідні коефіцієнти умовної формули (2.1). Використовуючи здобуту брутто-формулу, відповідно до табличних значень обирається оптимальна температура і коефіцієнт надлишку окисника для найвищої можливої калорійності синтез газу. Коефіцієнт надлишку окисника записується в K_a , і таким чином при керуванні витратами синтез газу поданого на реверс, забезпечується оптимальне значення в реакторі. Значення поточної температури в реакторі порівнюється з оптимальною, і таким чином формується сигнал помилки, що використовується нечітким регулятором, таким чином система керування остаточно замикається, і вироджується в класичну систему керування за помилкою. Структура нечіткого регулятора а також спосіб мутації його функцій приналежності вхідних змінних описані нижче

3.3 Окремі вузли системи керування.

3.3.1 Імітаційна модель об'єкта керування.

Для виконання досліджень, формування керуючих впливів, оцінки показників якості керування за умови складності проведення дослідів на «живому» реакторі, необхідне використання імітаційної моделі. Імітаційна модель, при цьому, має відповідати таким критеріям, як відповідність моделі заданій таблицею передатних функцій в таблиці 2.4, а також має надавати оцінку калорійності синтез газу. Для оцінки теплотворної здатності синтез-газу використано вираз (2.3). Модель було побудовано в програмному пакеті Simulink/Matlab

Структура імітаційної моделі ОУ, розробленої в попередньому розділі наведена на рисунку 3.2

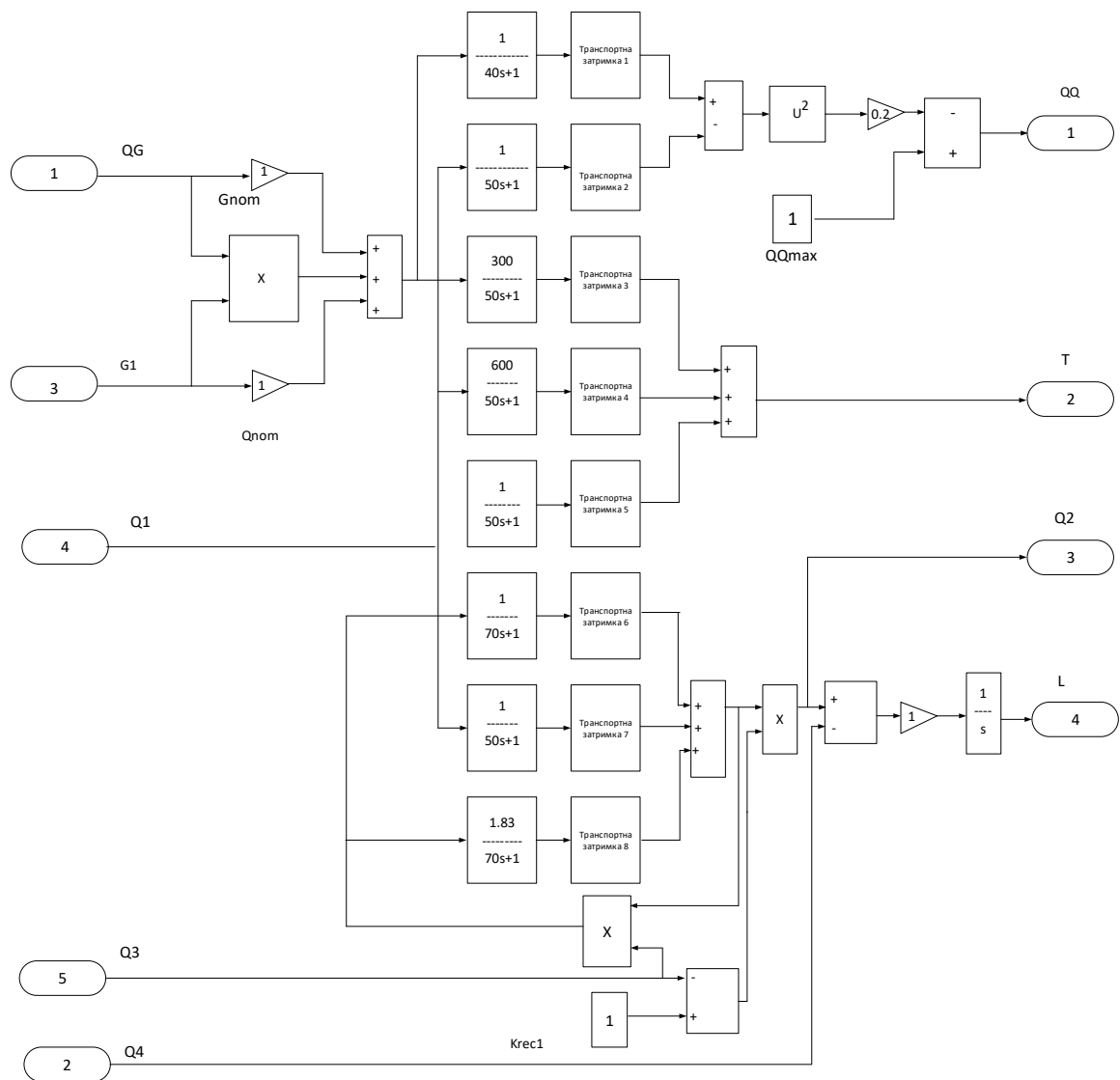


Рисунок 3.2 Структура моделі об'єкта управління.

3.4 Нечіткий регулятор температури, витрати повітря і витрати біомаси

Система нечіткого виводу реалізує наступні правила[69]

IF temperature_delta IS very_low THEN shaft IS go_fast AND gas IS gas_valve_open_strong

IF temperature_delta IS low THEN shaft IS go_medium AND gas IS gas_valve_open_strong

IF temperature_delta IS high THEN shaft IS go_slow AND gas IS gas_valve_open_weak

IF temperature_delta IS very_high THEN shaft IS go_very_slow AND gas IS gas_valve_open_weak

IF alpha_delta IS very_high THEN air_valve IS air_valve_open_weak
IF alpha_delta IS high THEN air_valve IS air_valve_open_medium
IF alpha_delta IS low THEN air_valve IS air_valve_open_strong,
IF alpha_delta IS very_low THEN air_valve IS air_valve_open_very_strong,

де *temperature_delta*, *alpha_delta* – вхідні змінні – відхилення температури і коефіцієнту надлишку окисника відповідно від завдання. Змінні *shaft*, *air_valve*, *gas* – вихідні змінні, а саме: *shaft* – швидкість подачі матеріалу в зону нагріву піролізного реактора, *air_valve* – ступінь відкритості клапану регуляції подачі повітря, *gas* – ступінь відкритості клапану реверсивної подачі синтез газу для спалювання в реакторі. Терми *very_low*, *low*, *high*, *very_high* – терми вхідних змінних. Терми *go_fast*, *go_slow*, *go_medium*, *go_very_slow* – терми вихідної змінної *shaft*. Терми *gas_valve_open_strong*, *gas_valve_open_weak*, - терми вихідної змінної *gas*. Терми *air_valve_open_weak*, *air_valve_open_medium*, *air_valve_open_strong*, *air_valve_open_very_strong* – терми вихідної змінної *air_valve*.

Структура нечіткого регулятора і ОУ зображена на рисунку 3.3

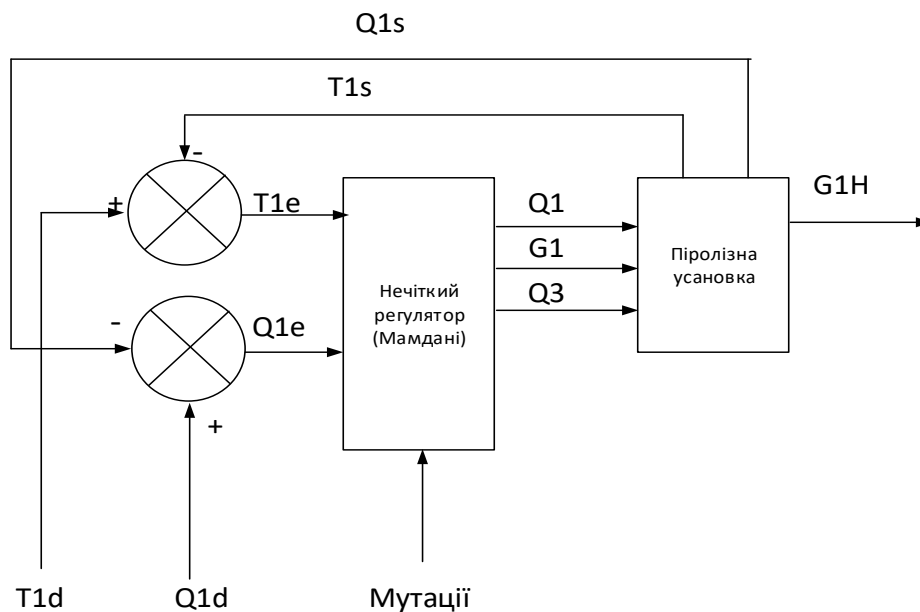


Рисунок 3.3 Структура нечіткого регулятора по температурі піролізу, витрат окисника і синтез-газу

Регулятор керує температурою піролізу, витратами окисника, соломи, і синтез-газу, поданого на реверс, керуючись значеннями помилки температури і витрат окисника. Помилки температури і витрати окисника обчислюються як різниця між завданнями температури, і завданням витрат окисника. Завдання температури і витрат окисника обчислюються як показано вище. Виконуючи обчислення за наведеними вище правилами вираховуються креучючі впливи витрати окисника, витрати соломи і витрати синтез-газу. Як реакція на збурення додатково обчислюються зміни функцій приналежності нечіткого реактора – мутації, що застосовуються безпосереднь до регулятора. Процес обчислення мутацій описано в підрозділі 3.5.

3.5 Екстремальний регулятор температури в тестовому реакторі

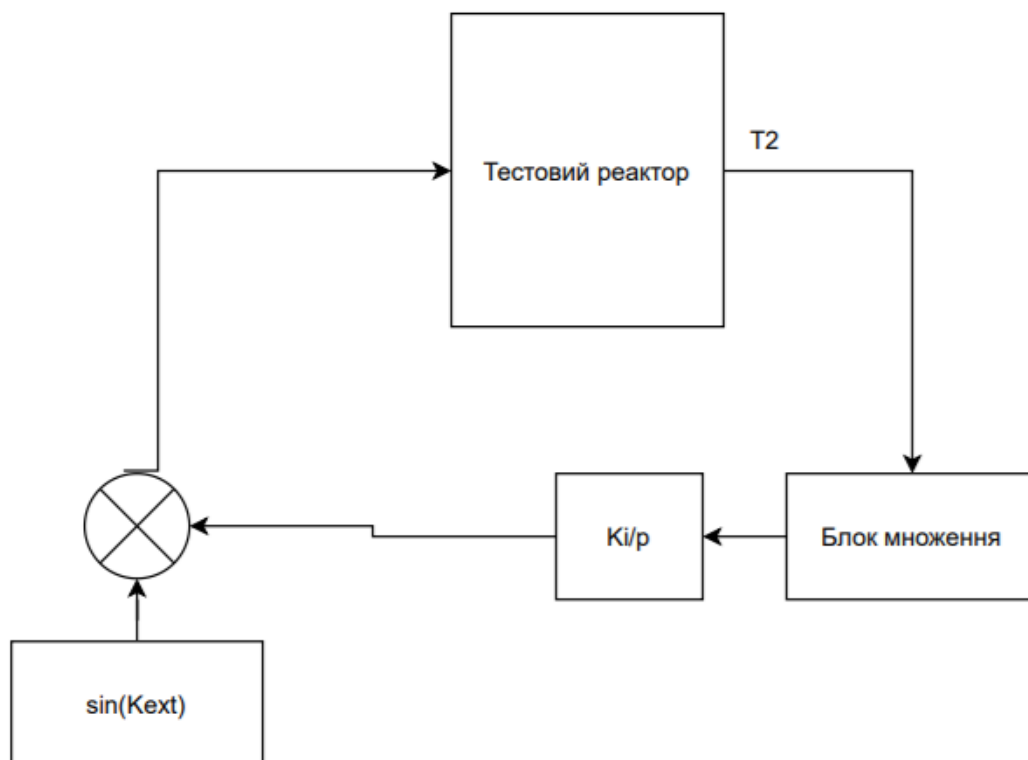


Рисунок 3.4 Структура екстремального регулятора

Екстремальний регулятор, схема якого зображена на рисунку 3.4 виконує задачу підтримки максимуму температури в ізоентальпійному пристрої(тестовий реактор). Як показано вище, така температура за незмінних характеристик палива(синтез-газу) означає досягнення коефіцієнту надлишку окисника рівному 1, що в свою чергу необхідно для обчислення складу палива. Обчислювання складу палива за урахуванням кількості окисника і вуглицевого залишку в піролізній установці дозволяє, в свою чергу, визначити склад речовини, яка проходить процес піролізу в установці. З тестового реактора знімається температура T2, після чого отриманий сигнал множиться і інтегрується з синусоїдальним сигналом керуючого впливу, таким чином отримується новий керуючий вплив, що веде значення температури в тестовму реакторі до максимуму.

3.6 Модифікація функцій приналежності нечіткого регулятора

З метою компенсації відхилень сталих часу описаних вище в об'єкті управління, було розроблено згортку [68], що модифікує функції приналежності термів змінних нечіткого регулятора. Оскільки вид вхідних змінних являє собою трикутні функції, то їх можна описати вектором кортежів виду:

$$[k_1, k_2, k_3, \dots, k_n, k_{n+1}, k_{n+2}], \quad (3.1)$$

де $k_1, k_3 \dots k_n, k_{n+2}$ - точки нулів функції, а $k_2, \dots, k_{n+1}$ – вершини трикутника.

Кожній вхідній змінній у відповідність поставлено многочлен виду:

$$a_1 + a_2 + a_{n+2}, \quad (3.2)$$

де $a_1 \dots a_{n+2}$ - коефіцієнти, що тренуються шляхом лінійної регресії. Вхідними даними для тренування коефіцієнтів – є значення відхилення сталої часу у межах $[-5; 5]$.

Вихідними значеннями є значення кортежів (3.2), отримані шляхом ручного налаштування нечіткого регулятора в точках, що належать тренувальному датасету.

В ході досліджень було виявлено, що достатньо модифікувати лише вхідні змінні нечіткого регулятора.

3.7 Дослідження стійкості петлі управління нечіткий регулятор-піролізна установка

Варто зауважити, що критерій Попова - лише достатня умова визначення стійкості, що дозволяє визначити нестійкі системи. Для отримання необхідної умови стійкості слід використовувати критерій стійкості Найквіста. Однак, цей критерій справедливий для лінійних систем. Разом з цим, коли ми вибираємо в якості межі сектора пряму $F(x) = k * x$, система стає лінійною, і для неї можна використовувати необхідну і достатню умову стійкості Найквіста. У такому випадку, достатньою умовою буде визначення стійкості згідно з критерієм Попова, а необхідною умовою, згідно з критерієм Найквіста, буде умова, згідно з якою для стійкої системи звичайний (Модифікований) годограф АФЧХ лінійної частини системи не переходить дійсну, вісь лівіше точки $-1 / k$. Проаналізуємо стійкість зазначеної системи, використовуючи необхідну умову стійкості Найквіста. Як видно з рисунку 3.5, годограф АФЧХ повністю розташований правіше прямої і не перетинає дійсну вісь лівіше точки $-1 / k$, таким чином, необхідна умова стійкості Найквіста виконується.

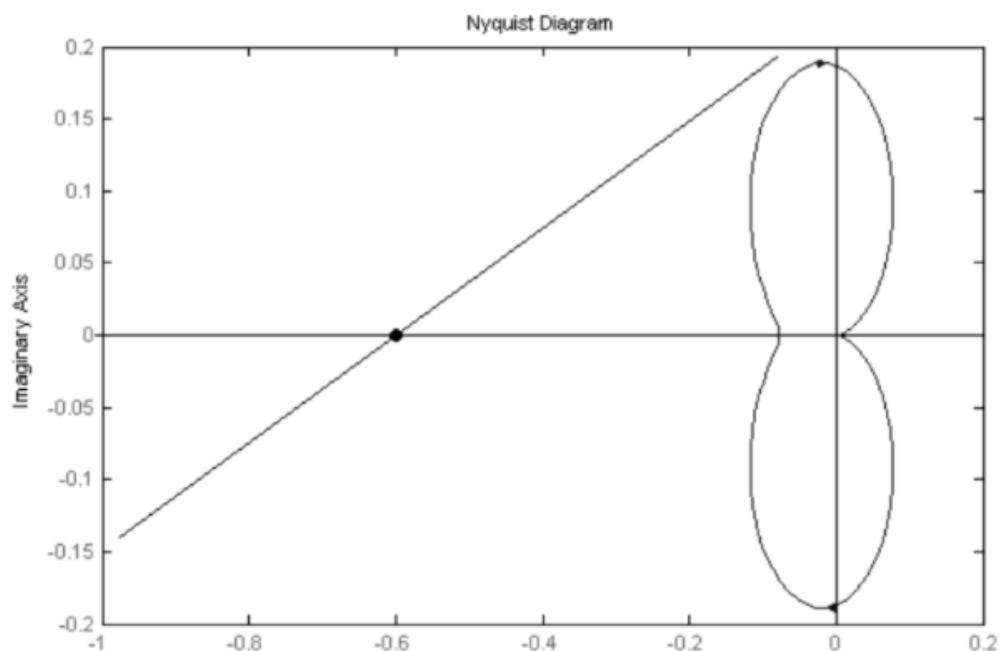


Рисунок 3.5 АФЧХ стійкості петлі управління нечіткий регулятор-піролізний регулятор

3.8 Моделювання

Моделювання проводилось шляхом емуляції зміни складу піролізної біомаси методом подачі ряду випадкових сигналів на відповідний вхід системи. Реакція показника на збурення, який було оцінено за виразом (2.4) теплотворної здатності отриманого синтез-газу зображена на рисунку 3.6.

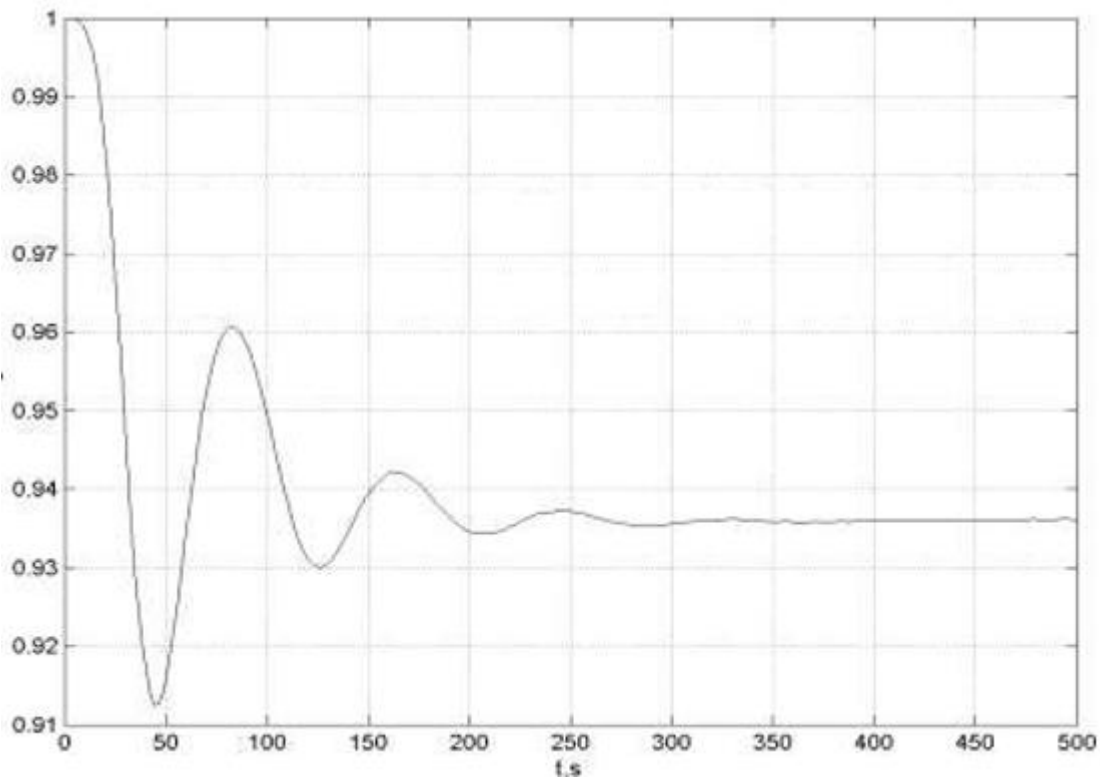


Рисунок 3.6 Реакція теплотворної здатності синтезу газу на збурень складу соломи, що проходить процес піролізу.

Моделювання виконувалося шляхом подачі сигналу збурення параметру, що відповідає зміні хімічного складу відходів агропромислового комплексу.

Другий раунд моделювання являв собою нанесення відхилення на сталу часу з тестового дата-сету, і зняттям характеристик якості керування – величини перерегулювання та часу регулювання. Результати занесені в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1

Величини відхилення сталої часу та отримані відповідно характеристики якості керування

	-3,9	-1	0	2,7	4,1
Перерегулювання, %	3,78	3,25	3	2,99	3,5
Час регулювання, с.	257	255	250	249	256

Як видно з таблиці 3.1, 6% відхилення сталої часу призводить до 2,8% зміни в якостях керування, з очевидним збереженням стійкості.

3.9 Висновки до третього розділу

1. Проаналізовано динамічні характеристики об'єкта управління – піролізної установки
2. Розроблено загальну структуру комп'ютерно інтегрованої системи управління піролізною установкою
3. Розроблено нечіткий регулятор Мамдані для керування піролізною установкою
4. Розроблено екстремальний регулятор температури для керування ізоентальпійним пристроєм, що уможливило використання алгоритму визначення складу біомаси агротехнологічного походження
5. Знайдено співвідношення, що відображають зміни динамічних характеристик піролізної установки, і розроблено алгоритм застосування цих співвідношень для мутацій функцій приналежності вхідних і вихідних змін нечіткого регулятора
6. Встановлено, що отримана система управління піролізною установкою досягає необхідного і достатнього критерія стійкості.
7. Оцінена робастність отриманої системи.

РОЗДІЛ 4. СИНТЕЗ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПІРОЛІЗОМ ВІДХОДІВ АГРОТЕХНОЛОГІЙ З ВИЗНАЧЕННЯМ СКЛАДУ СИНТЕЗ-ГАЗУ

У цьому розділі виконаний синтез КІСУ, що забезпечує стабілізацію значення теплотворної здатності отриманого синтез газу шляхом забезпечення оптимальної температури для піролізу конкретної речовини і компенсації збурення складу відходів агропромислових технологій за рахунок визначення в реальному часі складу речовини, що проходить піроліз в установці в даний момент, і імплементує закон керування описаний в другому розділі з використанням методів, описаних в третьому розділі.

У четвертому розділі вирішені такі завдання:

- визначення завдання проектування КІСУ;
- розробка методів і алгоритмів, що дозволяє реалізувати методи описані в другому і третьому розділі в реальному часі;
- перевірка працездатності моделей і методів описаних в другому і третьому розділах в умовах апаратних обмежень, і похибок пристроїв.

4.1. Завдання проектування комп'ютеризованої системи

Завданням проектування комп'ютеризованої системи управління є збір даних про стан процесу піролізу в режимі реального часу і управління параметрами, що впливають на якість процесу. Збір даних повинен проводитися з мінімальними похибками в комплексі з економічною та технічною доцільністю, дані повинні оперативно оброблятися. Керуючі впливи повинні в автоматичному режимі подаватися на регулюючі органи. Зв'язок між блоками повинен бути надійним і економічно виправданим. Сучасний рівень розвитку мікроелектроніки пропонує широкий вибір технічних рішень, як у вигляді готових промислових пристроїв, так і високотехнологічних компонентів, призначених для проектування і виробництва оригінальних схемотехнічних і програмних рішень. Сучасні мікроконтролери мають

обчислювальну потужність, яка перевершує промислові комп'ютери недалекого минулого, які, в свою чергу, вирішували весь спектр завдань аналізу та управління. Особливо хочеться відзначити тенденцію до розміщення в одному кристалі надзвичайно розвиненою вимірювальної і зв'язкової периферії. Об'єм пам'яті програм і оперативної пам'яті даних настільки великий, що позбавляє розробника програмного забезпечення від обмежень в складності застосовуваних алгоритмів.

Вбудовані інтерфейси USART, USB, I2C, SPI, CAN дозволяють інтегрувати мікроконтролери в практично будь-яке апаратне оточення.

Аналогово-цифрові перетворювачі мають високу точність, мале споживання і високу швидкодію, що обумовлює хорошу економічну ефективність вимірювань, порівнянну з ефективністю кращих зразків промислового вимірювального обладнання. Вимірювання фізичних величин, які пов'язані з використанням точної механіки і засновані, як правило, на вимірі електричної напруги доцільно проводити за допомогою вбудованого АЦП. До таких величин можна віднести температуру. Серед поширених методів вимірювання температури слід зазначити вимірювання опору в залежності від температури і вимір контактної різниці потенціалів (так звані термопари). Останні переважно для вимірювань температури близько 1000 градусів і більше. Метод вимірювання температури за допомогою вимірювання терморезисторів (частіше платинові датчики) менш схильний до впливу електромагнітних завад. Точності методів можна порівняти, тому при виборі методу будемо керуватися можливістю працювати з більш високими температурами.

При виборі лічильників витрат, при всіх інших рівних параметрах, перевагу будемо віддавати обладнанню, підтримуючий фізичний рівень інтерфейсу RS-485. Перевагою такого вибору є той факт, що фізику цього інтерфейсу використовують при реалізації протоколу MODBUS, який широко представлений в обладнанні лідерів виробництва промислового обладнання.

Загальна схема комп'ютеризованої системи управління процесом піролізу наведена в додатку В1. До складу системи входять:

- Центральний процесор;
- Блок живлення;

- Вимірювач температури піролізного реактора T1;
- Вимірювач температури вимірювального реактора T2;
- Вимірювач кількості окислювача (повітря) Q1;
- Регулятор кількості окислювача (повітря) Q1;
- Вимірювач кількості продукт-газу Q2;
- Регулятор швидкості подачі біомаси G1;
- Вимірювач кількості рециркуляційного газу Q3;
- Регулятор кількості рециркуляційного газу Q3;
- Вимірювач кількості окислювача (повітря) Q4;
- Регулятор кількості окислювача (повітря) Q4.

Всі вузли системи об'єднані в єдину мережу за допомогою інтерфейсу RS-485. Протокол передачі інформації-пакетний, з перевіркою повідомлень на наявність помилок. Центральний процесор (далі ЦП) є провідним пристроєм (master), всі інші блоки - ведені (slave). Блок центрального процесора підтримує три фізично незалежних інтерфейсів RS-485, що дає можливість логічного і геометричного рознесення блоків за трьома групами. Інтерфейс застосовуємо в гальванічно-розв'язаному виконанні, що підвищує перешкодозахищеність і надійність.

ЦП є одночасно інтерфейсом людина-машина. Дані і команди вводяться за допомогою клавіатури. Технологічна інформація виводиться на графічний дисплей у вигляді символів і графіків. Застосування сучасного обчислювального ядра на базі процесора Cortex™ -M4F з великими обсягами пам'яті програм і оперативної пам'яті дозволяє реалізувати алгоритми управління практично будь-якої складності. Висока швидкодія і розвинена вбудована периферія (апаратна підтримка множення з плаваючою комою, апаратний поділ, прямий доступ до пам'яті та ін.) забезпечують роботу в режимі реального часу.

Всі вимірювальні вузли та виконавчі механізми, що застосовуються в системі, вдають із себе автономні обчислювальні вузли, що знаходяться в безпосередній близькості від об'єктів вимірювання або керування. Управління та передача даних здійснюються за допомогою глобальних команд. Ресурси ЦП використовуються тільки для реалізації алгоритму управління і підтримки інформаційного обміну між

вузлами системи.

4.2 Модель і метод визначення складу відходів агропромисловості

Всі наведені вище результати розрахунків отримані за умови відомого складу вихідних речовин. У разі зміни виду, якості вихідної сировини ця умова порушується, і результати втрачають актуальність. Без ідентифікації складу вихідних речовин неможливо організувати керований процес їх термохімічної переробки.

Розрахунки під час дослідження всіх розглянутих процесів побудовані на використанні бруutto-формули вихідної речовини. Ще однією особливістю є ідентичність бруutto-формул вихідної речовини і продуктів реакцій. Ці властивості є основою методу визначення складу вуглеводневих речовин під час термохімічної переробки.

В [63] запропонований метод визначення складу горючого газу в процесі його спалювання. В основу методу покладена модель, що розглядається у цій статті. Але суміш газів, нехай і невідомого складу, яка може горіти, можна отримати з рідких і твердих вуглеводневих речовин у процесі їх газифікації з малими значення α . З урахуванням цих зауважень процес визначення складу будується так:

- в окремому пристрої невеликого розміру проводиться некерований процес газифікації речовини, склад якого необхідно визначити. При цьому витрата повітря, що подається на газифікацію, враховується;
- відповідно до методу, запропонованого в [63], у спеціальному пристрої спалюється газ, отриманий на попередньому етапі, і визначається його склад (бруutto-формула);
- спираючись на цю формулу і виключаючи повітря, витрачене на газифікацію на першому етапі, визначається бруutto-формула вихідної речовини.

Отже, на базі запропонованого алгоритму можна здійснити замкнутий технологічний процес оперативного визначення змінюваного складу суміші вуглеводневих речовин і їх керованої термохімічної переробки.

В існуючих методах вихідними даними для розрахунку виступають речовини

або суміші речовин відомого складу. Реальні суміші можуть складатися з великої їх кількості. Так, стандарт по хроматографії природного газу передбачає визначення відсоткового співвідношення більше ніж 30 назв індивідуальних речовин. У разі використання для термохімічної обробки побутових, сільськогосподарських та інших відходів існують ті самі проблеми визначення їх складу. Складнощі опису складу речовин і їхніх сумішей істотно зменшуються за використання їх брутто-формул (2.20). Використання всього чотирьох хімічних елементів (C), (H), (O) і (N) дозволяє описати склад більшості органічних речовин. Так, врахування ще одного елемента (S) дозволяє описати склад зазначеного вище природного газу. Простота брутто-формул за відомого складу вихідних речовин допускає їх застосування для розрахунку різних процесів термохімічних перетворень ([54,5], табл. 2.2). Такий універсалізм на початковому етапі слугував основою розширення застосовності брутто-формули для розрахунку на область повільного піролізу за відомого складу вихідної сировини (табл. 2.3).

Адекватні результати під час розрахунку процесів горіння і газифікації отримані внаслідок високих температур, що протікають. Наявність речовин, що конденсуються під час піролізу, є наслідком низьких температур і відносно швидкого видалення продуктів з реакційної зони (зони нагріву). З ростом температури їхня кількість зменшується, що підтверджується даними з табл. 2.3.

Піроліз, на відміну від спалювання та газифікації, характеризується отриманням конденсованих речовин (вуглистий залишок) і речовин, що конденсуються (дистилят). Вуглистий залишок є продуктом кінцевого розкладання вуглеводневих речовин. Тому ця модель добре описує процес його утворення. Речовини, що конденсуються, в реакційній зоні знаходяться у газоподібному стані, але не досягають кінцевої стадії розкладання. Для опису процесу їх утворення використовується в статті модель повинна бути доопрацьована, що є предметом подальших досліджень.

Зазначене спрощення розрахунків у разі використання брутто-формули лежить і в основі методу визначення складу газоподібних органічних речовин і сумішей у процесі їх спалювання [64]. Так само використання системи рівнянь подібної до

такої, що описана в [3], але для вирішення оберненої задачі свідчить про вдалість моделі. Такий універсалізм дозволив запропонувати метод визначення складу різних органічних речовин шляхом в загальному некерованої газифікації їх невеликої кількості. Такий процес газифікації і визначення складу брутто-формули може відбуватися в режимі реального часу паралельно з основним процесом термічної переробки речовин, і забезпечити його регульованість і керованість.

Запропонована єдина модель ідентифікації складу продуктів спалювання, газифікацій і повільного піролізу може слугувати базою для розрахунку необхідних параметрів і управління на їх основі відповідними процесами. Це не виключає необхідності інженерно-технологічного, метрологічного забезпечення відповідних процесів і вимагає додаткових досліджень

4.3 Апаратна складова

4.3.1 Термометри

В якості вимірювача температури використовується термопара типу К.

Даний вид термопар широко застосовується для вимірювання температур до 1300°C. На холодному спаї формується термо-ЕРС 39 мкВ / град.

Температура холодного спаю вимірюється за допомогою цифрового термометра DS18B20 фірми MAXIM з точністю 0.5 град. У додатку В3 приведена схема датчика температури. Датчик оснащений високопродуктивним мікроконтролером STM32F373RCT6 з обчислювальним ядром Cortex™ -M4F. Два вимірювальних канали використовують для попереднього посилення напруги термопари високоякісний операційний підсилювач AD8552ARZ фірми Analog Devices. Посилена напруга термопари надходить на вхід 16 розрядного дельта сигма аналогово-цифрового перетворювача, що входить до складу периферійних пристроїв мікроконтролерів. Вся подальша обробка сигналу і витяг шуканої температури відбуваються програмно. Основною перевагою такої вимірювальної схеми є мінімізація апаратних похибок, низька собівартість і висока алгоритмічна гнучкість.

Цифрова фільтрація в поєднанні з високою частотою роботи АЦП і інерційністю об'єкта вимірювання забезпечують придушення вимірювальних шумів.

4.3.2 Протокол обміну даними

Дані передаються між вузлами мережі під управлінням ЦП за принципом запит-відповідь. Кожен вузол має свою унікальну адресу, що має розмір один байт. Таким чином, в системі можуть бути присутніми 255 самостійних пристроїв. Кожна інформаційна посилка має наступні поля:

- прапор, що сигналізує про початок передачі;
- адреса приймача;
- зводки передавача;
- розмір поля даних;
- код команди;
- поле даних від 0 до 255 байт⁴
- двухбайтне значення контрольної CRC суми.

Подібній організації інформаційного обміну притаманна відмінна гнучкість, її легко масштабувати і захищати від виникнення помилок і колізій. Пакети даних передаються на стандартній швидкості 115200 біт / с.

ЦП процесор виконує роль ведучого (master), решта вузлів роль ведених (slave). ЦП може звернутися до будь-якого вузла і передати команду або запит на передачу даних. У разі збігу адреси ведений пристрій виконує команду і / або передає дані. Така архітектура захищена від виникнення конфліктів передачі даних, що критично важливо для сталої роботи технологічного обладнання. Фізичний рівень передачі команд і даних представлений перешкодозахищеним інтерфейсом RS-485, специфікація якого гарантує роботу вузлів, рознесених на відстані більше кілометра, що більш ніж достатньо для нашої задачі. У разі застосування в системі покупних вузлів, якими можуть бути витратоміри, поворотні заслінки і інше, є широкий вибір промислового обладнання, що має вбудований інтерфейс RS-485 і підтримує протокол обміну даними MODBUS, так само представляє з себе один з варіантів

пакетної асинхронної послідовної передачі даних . У разі застосування покупного периферійного обладнання з інтерфейсом 4-20 мА слід застосувати перехідник/адаптер, що приводить сигнали до інтересу RS-485.

Серед виробників такого обладнання відзначимо фірми FLEXIM, GPE, Magnetrol, Siemens, що мають в Україні своїх офіційних дистриб'юторів.

Список функцій опитування датчиків:

- запит температури T1;
- запит температури T2;
- запит витрати Q1;
- запит витрати Q2;
- запит витрати Q4;
- запит витрати Q5.

Витрата Q3 дорівнює Q2-Q5, датчик витрати не потрібно.

Список функцій управління виконавчими механізмами:

- команда на установку поворотного клапана в певну позицію;
- команда на включення двигуна подачі біомаси на певній швидкості.

4.3.3 Апаратні засоби реалізації алгоритмів і методів керування

- Центральний процесор;
- Ядро: ARM 32-розрядний процесор Cortex [™] -M4F (72 МГц макс.), одноциклове множення та апаратне ділення, інструкції DSP з блоком з плаваючою точкою та MPU (блок захисту пам'яті);
- 256 Кбайт флеш-пам'яті;
- 32 Кбайт SRAM з апаратною перевіркою парності;
- Вбудований багатоканальний 16-розрядний сигма-дельта аналогово цифровий перетворювач;
- Два 32-бітові таймери та три 16-бітові таймери з до 4 IC / OC / PWM або лічильником імпульсів;
- Два 16-розрядних таймера з до 2 IC / OC / PWM або лічильник імпульсів;

- Чотири 16-бітові таймери з до 1 IC / OC / PWM або лічильник імпульсів;
- Незалежні та системні сторожові таймери;
- Таймер SysTick: 24-бітний зворотній лічильник;
- Три 16-розрядних базових таймера для керування ЦАП;
- CAN-інтерфейс (2.0B Active);
- Два інтерфейси I2C; підтримка швидкого режиму Плюс (1 Мбіт / с) із струмом 20 мА, SMBus / PMBus, пробудження від STOP;
- Три USARTs, що підтримують master-синхронне управління SPI та модемом; з Інтерфейсом ISO7816, LIN, можливість IrDA, автоматичне визначення швидкості передачі даних, функція пробудження;
- Три SPI (18 Мбіт / с) з 4 до 16 програмований бітовий кадр, змішаний I2S;
- Інтерфейс шини HDMI-CEC;
- Повношвидкісний інтерфейс USB 2.0;
- Блок розрахунку CRC;
- 12-канальний контролер DMA (прямий доступ до пам'яті);
- Підтримка прямого доступу до пам'яті;

Фактором, що збільшує продуктивність і обчислювальну потужність системи, є апаратна підтримка прямого доступу до пам'яті ПДП. Звернення до вбудованої в мікроконтролер периферії, такий як АЦП, зчитування і накопичення даних відбувається без участі центрального процесора (ЦП). ЦП звільняється від необхідності підтримки введення виведення і може обслуговувати підпрограми обчислення значень функцій, рішення систем рівнянь, запису та зчитування даних в зовнішню пам'ять. ПДП надає системі властивості, що вигідно відрізняють її від масових неспеціалізованих промислових контролерів.

Для роботи системи необхідна інформація про велику кількість технологічних параметрів, вузлів, власне складових системи. До таких параметрів належать значення налаштувань протоколів обміну з зовнішнім устаткуванням (поворотні заслінки, вимірювачі витрати газів), фізичні параметри реакторів, калібрувальні коефіцієнти вимірювачів температури і витрати, наявність вбудованого в систему обладнання. Таку інформацію недоцільно зберігати в постійній пам'яті програм. Для

її зберігання використовуємо мікросхему послідовної Flash - пам'яті AT45DB21 ємністю 2 Мбіт.

Схема підключення приведена в додатку В2. Організація пам'яті сторінкова і оптимізована під обмін блоками пам'яті. Другим елементом енергонезалежній пам'яті буде служити мікросхема EEPROM AT24C04 ємністю 4 Кбіт. У ній будемо зберігати стан обладнання в міру виконання технологічного циклу для швидкого повернення в початковий стан в разі короточасних збоїв, пов'язаних, наприклад, зі збоями живлення.

Наявність оперативної незалежної пам'яті істотно збільшує стійкість системи до збурень і, в багатьох випадках, гарантує продовження технологічного циклу, що в умовах тривалої роботи процесу піролізу бажано.

Інтерфейс RS-485 зарекомендував себе як недорогий, зручний і надійний засіб обміну інформацією в умовах перешкод і є одним зі стандартів такого обміну.

Застосовуваний мікроконтролер STM32F373RCT6 має можливість одночасної незалежної підтримки трьох послідовних портів USART. Підключення до цих портів трьох приймачів SN65HVD-10 формує три незалежних інтерфейсу RS-485. Це дозволяє здійснювати прийом і передачу інформації на швидкостях до 1 Мбіт / с. Для забезпечення високої перешкодозахищеності будемо працювати на швидкості 115200 біт / с, яка найбільш поширена в промислових мережах обміну інформацією. У додатку В1 приведена схема об'єднання всіх обчислювальних, вимірювальних і виконавчих блоків системи в єдину мережу. Як було зазначено вище, RS-485 підтримує протокол MODBUS, що не обмежує нас виборі покупних виконавчих і вимірювальних вузлів.

Одним з найістотніших джерел перешкод в системах з розподіленими параметрами є наявність гальванічного зв'язку між блоками. Особливо актуальним це стає в разі підключення блоків, які працюють на відстанях один від одного в умовах дії промислових перешкод. Для запобігання цього ефекту можна застосувати гальванічну розв'язку між усіма блоками за допомогою мікросхеми SI8631-B-IS1 фірми Silicon Labs, що вдає із себе спеціалізований трьохканальний приймач з гальванічною розв'язкою, спроектований для застосування в мережах RS-485. Він

підтримує швидкість передачі до 150 Мбіт / с і розрахований на ізоляцію напруг до 5 КВ.

4.3.4 Інтерфейс введення виведення

Графічний дисплей. Клавіатура.

В процесі роботи системи виникає необхідність участі оператора в технологічному процесі. Старт, контроль параметрів, діагностика стану вузлів, зупинка процесу. Все це передбачає візуалізацію в зручному вигляді. Для вирішення цього завдання можна застосувати графічний рідкокристалічний дисплей RG240128B-FHW-M, що має дозвіл 240 на 128 точок. Дисплей управляється ЦП по 8-бітної паралельної шині, має змінювані яскравість і контрастність. Дозволяє виводити інформацію в графічному і символічному вигляді. Здатний відтворювати графіки, гістограми і цифрові значення всіх необхідних параметрів. Має низьке енергоспоживання, а наявність підсвічування забезпечує комфортний знімання інформації навіть в умовах поганого освітлення.

Для мінімізації розмірів і стійкості до умов роботи в умовах промислового забруднення введення інформації і команд будемо здійснювати за допомогою 8 кнопок виконання IP-65. Вибір режиму, старт, стоп, підтвердження, збільшення параметра, зменшення параметра - короткий список значення використовуваних кнопок. Зайвий органи управління вважаємо недоцільним.

4.3.5 Блок вимірювання температури

У додатку В3 приведена схема застосування датчика температури.

Ядром датчика є мікроконтролер STM32F373RCT6 такий же, як і в блоці ЦП. Як було відзначено в пункті 4.6, датчик розроблений під застосування з термопарою типу К, температура холодного спаю вимірюється мікро контролером DS18B20. Для зручності обслуговування (тестування, настройка) датчик забезпечений чотирирозрядним семі-сегментним світлодіодним індикатором і двома енкодерами.

Індикатор дозволяє візуалізувати необхідні параметри, енкодери пропонують можливість ручного вибору режимів і введення команд і значення обраних параметрів. Для збереження калібрувальних коефіцієнтів і налаштувань датчик забезпечений мікросхемою незалежній EEPROM пам'яттю AT24C04 ємністю 4 Кбіт. Датчик забезпечений гальванічески розв'язаним драйвером МOC3062, що дозволяє підключити тиристорне або сімісторне навантаження. Драйвер застосований для можливості функціонального розширення, наприклад, для управління заслінкою.

У додатку В4 приведена схема драйвера електродвигуна, виконаного на силовому гібридному модулі IKCM10L60GA компанії Infineon Technologies. Драйвер безпосередньо підключається до датчика температури через гальванічно розв'язаний порт. Управління електродвигуном здійснюється від процесора, розташованого в датчику температури по командам від блоку ЦП через інтерфейс RS-485. Як і в блоці ЦП, фізичний рівень інтерфейсу RS-485 виконаний на мікросхемі SN65HVD-10.

Основним завданням, розв'язуваної датчиком температури є вимір напруги на термопарі і математична обробка результатів вимірювань. Методи цифрової обробки сигналів добре досліджені і описані в літературі [81], [82], [83], [84], [85], [86].

Визначення температури засноване на використанні таблиці значень напруг на термопарі в залежності від температури. Таблиця цих значень з дискретністю 0.1 °C заноситься в пам'ять мікроконтролера.

Виміряне значення порівнюється з найближчим табличним значенням, таке приймається за вимірюване. Такий спосіб має мінімальну методичну помилку, тому що не використовує ніяких аналітичних і апроксимуючих залежностей. Загальна помилка методу зводиться до помилки аналого цифрового перетворення і впливу промислових шумів на вхід вимірювального перетворювача. Мультиплікативні і адитивні помилки вимірювального тракту нівелюються на етапі калібрування. У тому числі програмно коригується температурний дрейф перетворювача шляхом обліку температури кристала мікроконтролера. Мікроконтролер має в складі своєї периферії власний датчик температури кристала, опитуваний програмно. Методом боротьби з промисловими шумами є цифрова фільтрація вхідного сигналу. Особливу увагу приділено стабілізації напруги живлення АЦП. Для вирішення цього завдання

використовується інтегральне джерело живлення LP2985-3.3 фірми Texas Instruments. Інструментарій цифрових фільтрів досить широкий, але ми будемо виходити з факту великий (порядку секунд) постійної часу теплових процесів. В такому випадку доцільно застосовувати метод передискретизації (оверсмплінг). Як було зазначено вище, ми оперуємо даними з дискретністю 0.5 градуса на діапазоні 1000 °C. Наше завдання зводиться до придушення вхідного шуму таким чином, щоб його рівень не приводив до помилок в молодшому розряді АЦП. АЦП отримує дані з частотою 200 КГц, постійна часу теплових процесів порядку секунди (насправді набагато більше, сам матеріал термопар є фактичним інтегратором теплових процесів). Запас по частоті дискретизації виходить три порядки. В нашій реалізації ми застосовуємо кільцевої буфер довжиною 1000 відліків. З огляду на той факт, що температура холодного спаю вимірюється з точністю 0.5 град, загальна помилка вимірювання складає 1 градус. На загальному діапазоні вимірювань 1000 градусів помилка вимірювання буде 0.1%. Повільний піроліз в киплячому шарі проводиться при температурах порядку 400 град, Що відповідає помилку 0.4%. Облік помилки вимірювання холодного спаю погіршує це значення до 0.5%.

Експериментальна перевірка точності вимірювання виготовленого зразка термодатчика дала похибку 0.1 °C по каналу АЦП в діапазоні від 25 до 450 градусів за Цельсієм що є підтвердженням правильності обраного підходу.

Розрахунок помилки:

$$Z = \sqrt{\Delta Z_a^2 + \Delta Z_b^2 + \dots} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial a}\right)^2 \Delta a^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial b}\right)^2 \Delta b^2 + \dots} \quad (4.1)$$

де:

Δa – помилка визначення температури;

Δb – помилка визначення витрат парціального тиску;

$f(a,b)$ – функція визначення складу газу по температурі і парціальному тиску, і відповідні часткові похідні цієї функції по температурі і парціальному тиску.

Слід мати на увазі, що при спільному впливі зміни температури і тиску інтенсивніше діє температура, ніж тиск, тому що вплив температури на швидкість

збільшення діє через експонентну залежність (за законом Арреніуса). Принаймні при одночасному спільному впливі на хімічно активне робоче тіло зниження тиску і температури реакція системи переважно залежна від зміни температури. Протилежна дія - зниження тиску слабо позначається на реакції системи.

4.3.6 Засоби розширення. Інтерфейс USB

Мікроконтролер STM32F373RCT6 має вбудовану апаратну підтримку інтерфейсу USB. Інтерфейс може бути корисний для підключення блоку ЦП до персонального комп'ютера або FLASH накопичувача, що дає нам можливість завантажувати необхідні дані на етапі налагодження і техобслуговування.

4.4 Програмні складові методів обробки інформації і керування КІСУ

4.4.1 Метод цифрової фільтрації

Використовується для зниження рівня шуму в каналі вимірювання температури. Формується кругової буфер у вигляді масиву значень аналого-цифрового перетворювача із записом нових значень зі зміщенням індексу. Після завершення циклу запису масиву на всю довжину відбувається усереднення. Отриманий результат вважається правильним значенням. Частота перетворення АЦП становить 200 КГц. Час перетворення 50 мкс. Буфер довжиною 1000 відліків заповнюється за 5 мс, що за однакової кількості постійної часу реактора близько 10 с, дозволяє придушити шум до рівня молодшого біта АЦП.

4.4.2 Метод визначення температури

Визначення температури засноване на співвіднесенні напруги на термопары з табличним значенням залежності напруги від температури. Після програмної обробки цифровим фільтром значення, вимірювання ФЦП отримуємо результуючу напругу,

що не містить високочастотні складові. З огляду на той факт, що наш АЦП має розрядність 16 біт, ми оперуємо даними з дискретністю 0,5 градуса на діапазоні 1000 °С. Для гарантованої відсутності перешкоди в молодшому розряді застосуємо процедуру оверсмплінга. При стандартній швидкості роботи АЦП 200КГц маємо можливість знизити швидкість обрахунку системи в 4 рази, практично нічого не втративши в швидкості вимірювань.

Особливо слід відзначити метод визначення температури холодного спаю. Очевидно, що класичний метод термостабілізації холодного спаю для нашого випадку неприйнятний. Будемо використовувати широко відомий мікропроцесор-термометр DS18B20, При підключенні цього термометра використовується одно провідний інтерфейс. Датчик має можливість коригування.

\

4.4.3 Програмна складова методу завантаження коефіцієнтів хімічної рівноваги

Дані, що містять коефіцієнти хімічної рівноваги створюємо в вигляді двовимірних масивів, за першими індексами яких ми маємо в своєму розпорядженні масив температур з кроком 1 градус, по другим індексам - відповідні коефіцієнти рівноваги. Як було показано в розділі 3, ми використовуємо в розрахунках 8 реакцій

Таблиця 4.1

Список хімічних реакцій

1	$CO \leftrightarrow C + O$
2	$CO_2 \leftrightarrow C + 2O$
3	$H_2O \leftrightarrow 2H + O$
4	$OH \leftrightarrow O + H$
5	$H_2 \leftrightarrow 2H$

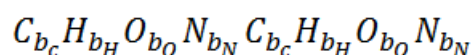
продовження табл. 4.1

6	$O_2 \leftrightarrow 2O$
7	$N_2 \leftrightarrow 2N$
8	$NO \leftrightarrow N + O$

Для вирішення завдання організуємо 8 двовимірних масивів, що відповідають перерахованим реакціям. Вихідна інформація знаходиться в [45].

4.4.4 Програмна складова методу визначення брутто-формули газу

Склад палива заданий бруто формулою будемо шукати у вигляді, згідно з 2.20:



Згідно 2.22 – 2.35 введемо позначення:

для CO_2 :

$$K_{CO_2} - \frac{P_C P_{O_2}^2}{P_{CO_2}} = 0 \text{ далі } f_1, \quad (4.2)$$

Для CO :

$$K_{CO} - \frac{P_C P_O}{P_{CO}} = 0 \text{ далі } f_2, \quad (4.3)$$

Для H_2O :

$$K_{H_2O} - \frac{P_O P_H^2}{P_{H_2O}} = 0 \text{ далі } f_3, \quad (4.4)$$

Для OH :

$$K_{OH} - \frac{P_H P_O}{P_{OH}} = 0 \text{ далі } f_4, \quad (4.5)$$

Для NO :

$$K_{NO} - \frac{P_N P_O}{P_{NO}} = 0 \text{ далі } f_5, \quad (4.6)$$

Для H_2 :

$$K_{H_2} - \frac{P_H^2}{P_{H_2}} = 0 \text{ далі } f_6, \quad (4.7)$$

$$f'(x) = W(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Вираз (4.8) в короткій записи можна уявити:

$$f'(x) = W(x) = \left[\frac{\partial f_i}{\partial x_j} \right] \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (4.23)$$

Вираз (4.23) являє собою лінійну систему щодо поправок ($i = 1, 2, \dots, n$) з матрицею $W(x)$, тому формула (4.23) може бути записана в наступному вигляді:

$$f(x^{(p)}) + W(x^{(p)})\varepsilon^{(p)} = 0 \quad (4.24)$$

Звідси, припускаючи, що матриця $W(x^{(p)})$ - неособлива, отримаємо:

$$\varepsilon^{(p)} = -W^{-1}(x^{(p)})f(x^{(p)}) \quad (4.25)$$

тепер, підставивши вираз (4.24) в формулу (4.25), остаточно отримаємо:

$$x^{(p+1)} = x^{(p)} - W^{-1}(x^{(p)})f(x^{(p)}) \quad (p=0, 1, \dots, k) \quad (4.26)$$

Таким чином, отримали обчислювальну формулу (метод Ньютона), де в якості нульового наближення $x^{(0)}$ можна взяти наближене (грубе) значення шуканого кореня.

Метод Ньютона вимагає нульове наближення, що знаходиться в малій околиці рішення. В іншому випадку знаходження рішення стає проблематичним. Апріорна інформація про знаходження коренів системи нелінійних рівнянь відсутня. Отже, для вирішення цієї проблеми необхідно застосувати метод, що не залежить від точності нульового наближення. [81]

Для знаходження початкового наближення рішення системи нелінійних рівнянь використовуємо метод градієнта (найшвидшого спуску)

Рішення системи (4.17), як і для системи лінійних рівнянь будемо шукати у вигляді:

$$x^{(p+1)} = x^{(p)} - \mu_p W'_p f^{(p)} \quad (4.27)$$

Тут $x^{(p)}$ и $x^{(p+1)}$ – вектори невідомих на p и $p+1$ кроках ітерацій; вектор нев'язок на p -му кроці $-f^{(p)} = f(x^{(p)})$; W'_p транспонована матриця Якобі на p – ому кроці:

$$\mu_p = \frac{(f^p, W_p W_p' f^{(p)})}{(W_p W_p' f^{(p)}, W_p W_p' f^{(p)})} \quad (4.28)$$

де:

$$W_p = \left[\frac{\partial f_i^{(p)}}{\partial x_i^{(p)}} \right] \quad (i, j=1, 2, \dots, n)$$

Важливою обставиною є той факт, що знаходження рішення системи нелінійних рівнянь методом градієнтного спуску вимагає більшу, ніж метод Ньютона, кількість програмних ресурсів. Це пов'язано з необхідністю обчислення на кожному кроці ітерації обчислення матриці Якобі.

Таким чином, необхідно застосовувати комбінований алгоритм, що поєднує в собі переваги обох алгоритмів. На початковому етапі методом градієнтного спуску шукається початкове рішення системи нелінійних рівнянь. Час виконання такого алгоритму повинен бути менше, ніж час зміни складу біомаси, яку піддають піролізу. Після чого дане рішення може бути прийнято як нульове рішення алгоритму Ньютона, тому що воно буде мало відрізнятися від початкового рішення. За умови, що склад біомаси не змінюється стрибкоподібно, кожне наступне рішення може бачь використано як нульове наближення для початку нового обчислення хімічного складу біомаси.

Блок-схема алгоритму рішення системи рівнянь наведена на рисунку 4.1

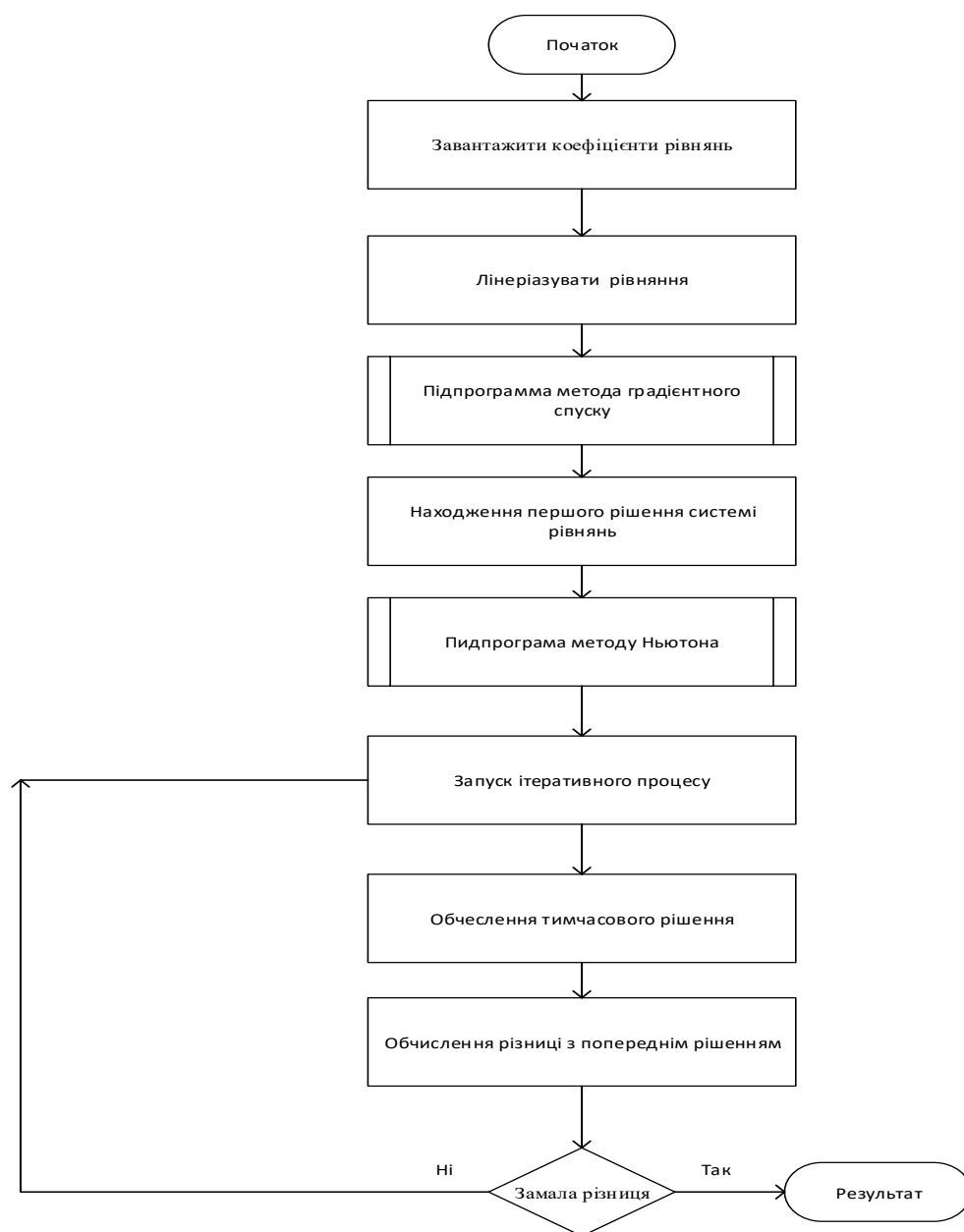


Рис. 4.1 Алгоритм рішення системи рівнянь

Блок-схема алгоритму визначення бруutto-формули газу наведена на рисунку 4.2

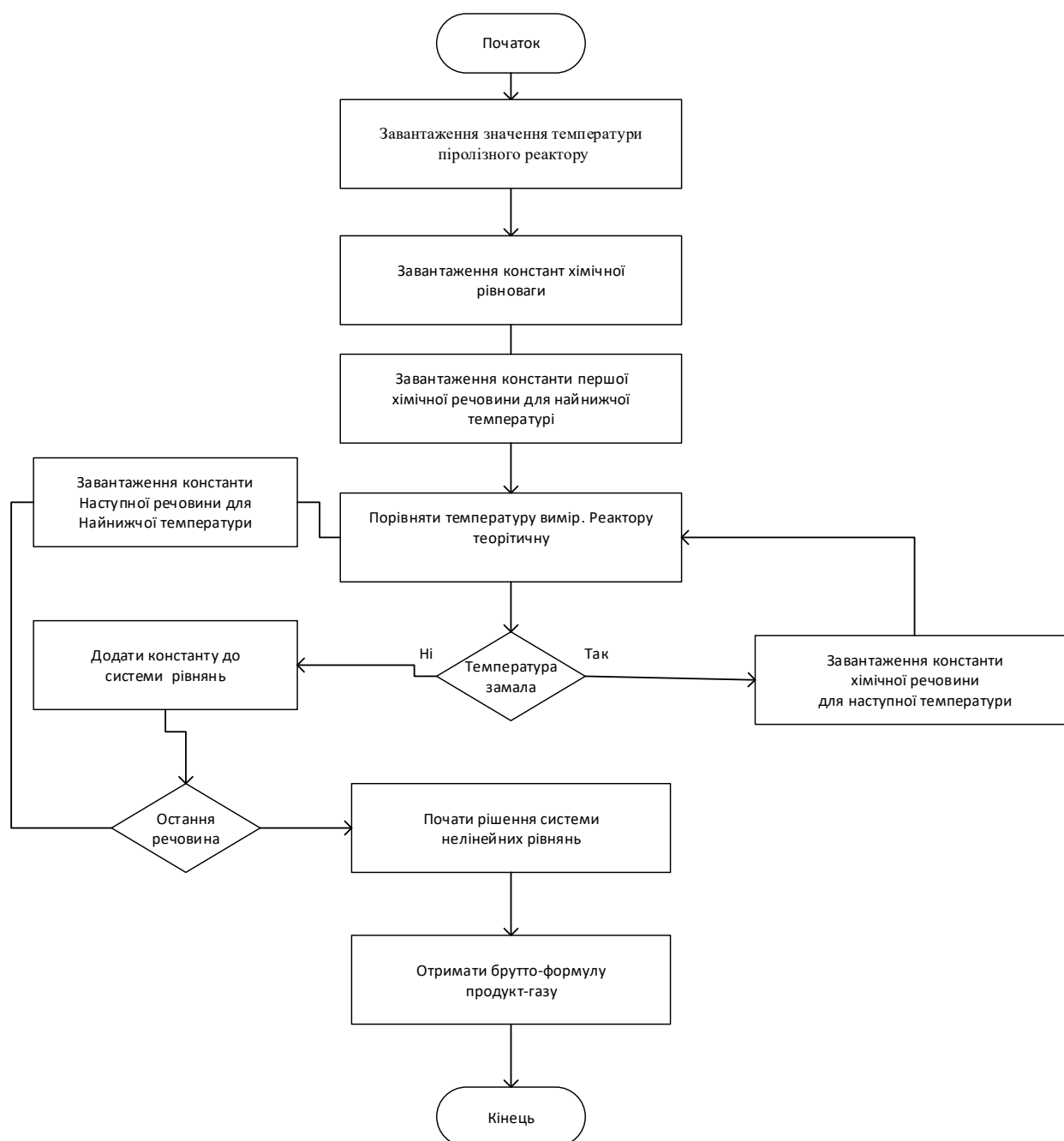


Рис. 4.2 Алгоритм визначення брутто-формули

4.4.5 Метод керування подачею повітря.

Блок-схема методу керування подачею повітря наведена на рисунку 4.3

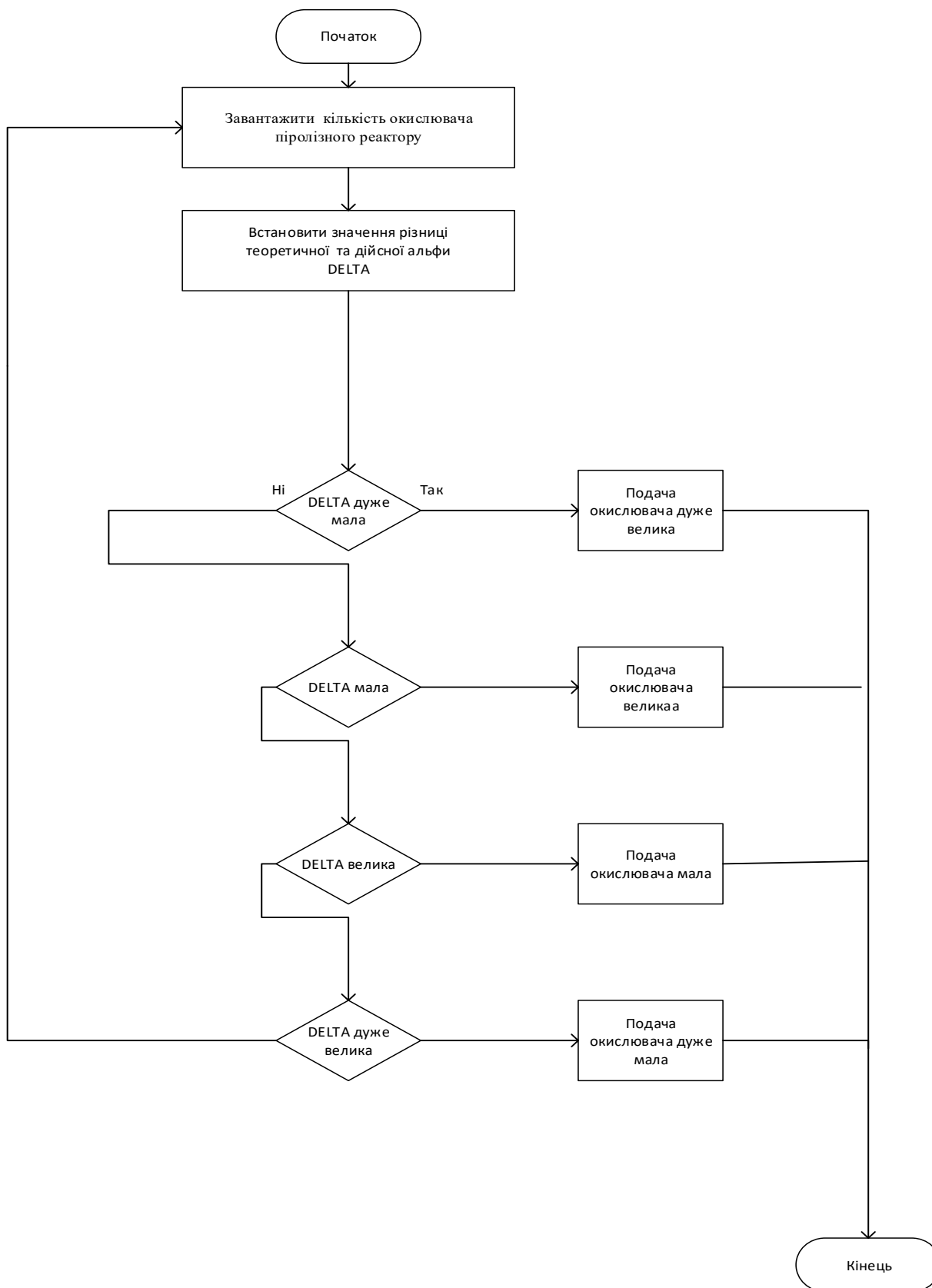


Рис. 4.3 Метод керування подачею повітря

Блок-схема методу керування подачею рециркуляційного газу наведена на рисунку 4.4

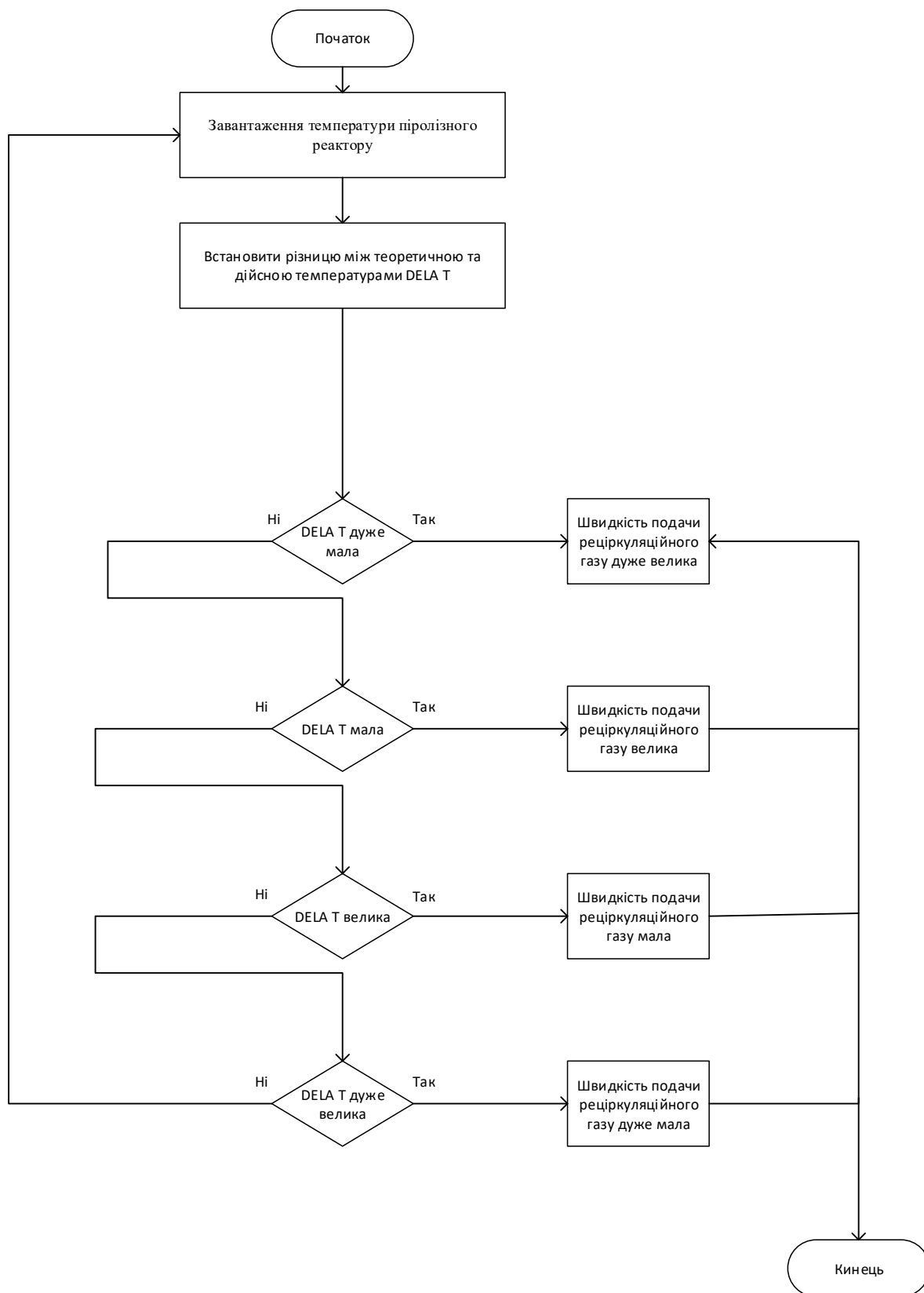


Рис. 4.4 Метод керування подачею рециркуляційного газу

4.4.6 Метод керування подачею біомаси

Блок-схема алгоритму методу керування подачею біомаси наведена на рисунку 4.5

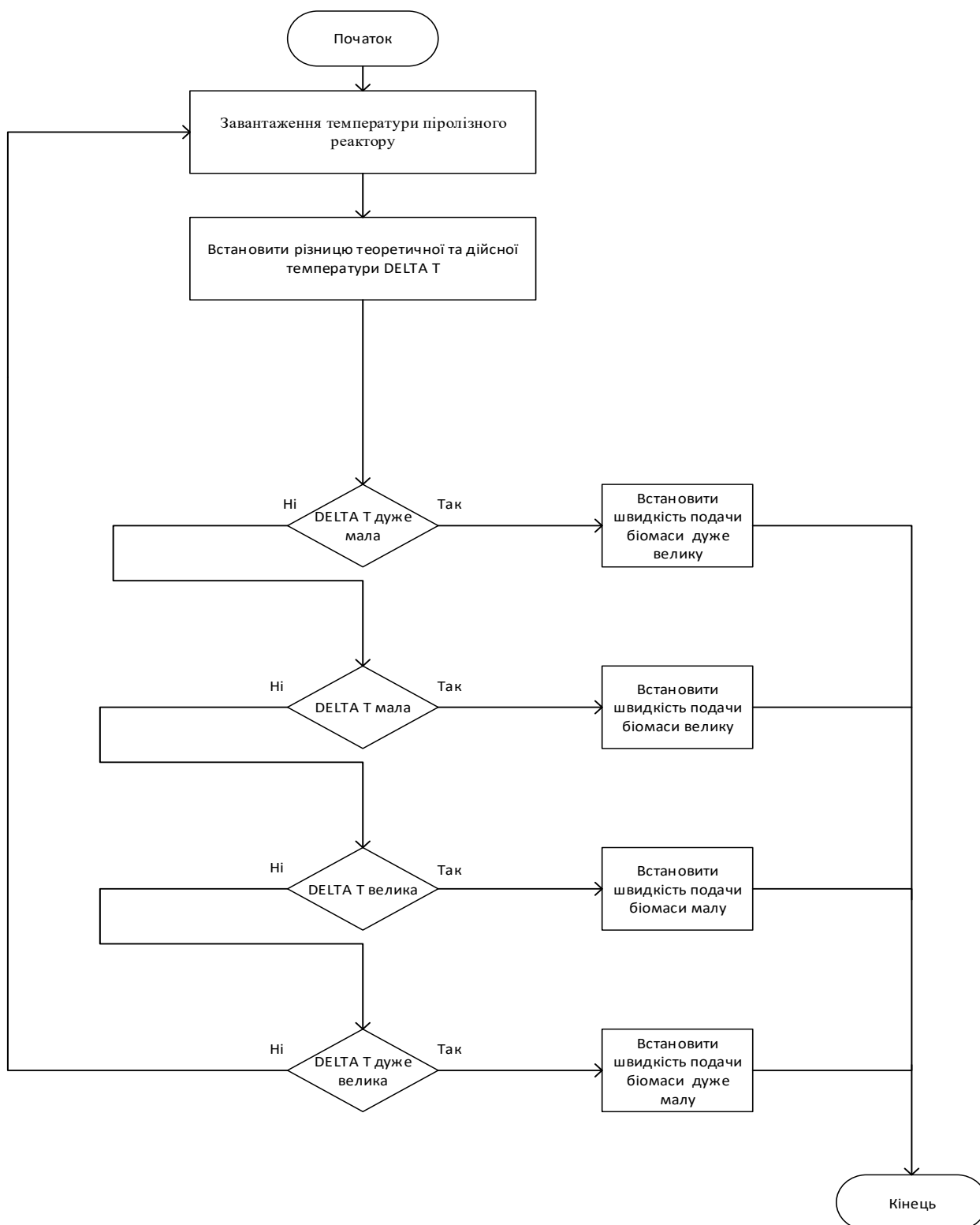


Рис. 4.5 Алгоритм методу керування подачею біомаси

4.4.7 Метод оптимізації виходу продукт-газу з максимальною ентальпією

Блок-схема алгоритма, що реалізує метод оптимізації вихіду продукт-газу наведена на рисунку 4.6

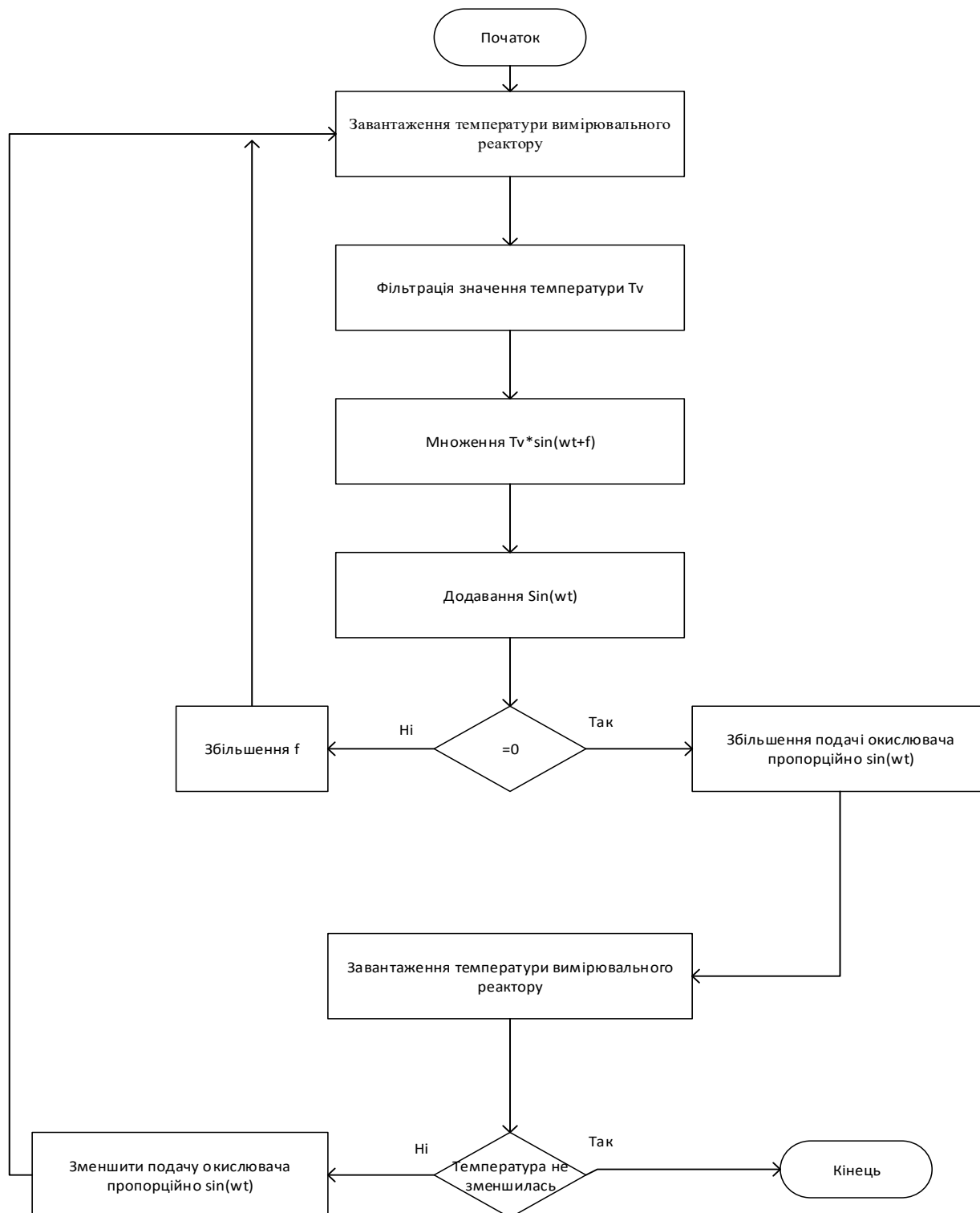


Рис. 4.6 Алгоритм методу оптимізації вихіду продукт-газу

4.4.8 Програмна реалізація методів керування.

Список змінних стану:

- Температура реактора піролізу T1;
- Температура вимірювального реактора T2;
- Ентальпія біомаси ;
- Ентальпія продукт-газу ;
- Кількість продукт-газу Q2;
- Кількість продукт-газу, що надходить в вимірювальний реактор Q5;
- Брутто-формула продукт-газу.

Список змінних керування:

- Витрата окислювача піролізного реактора Q1;
- Витрата окислювача вимірювального реактора Q4;
- Кількість продукт-газу, що надходить в вимірювальний реактор Q3;
- Кількість біомаси G1.

Список функцій обміну даними:

- Запит на передачу температури;
- Запит на передачу витрати;
- Запит на передачу швидкості двигуна.

Алгоритм програми реалізує функцію управління процесом піролізу біомаси невідомого складу методом визначення брутто-формули продукт-газу за допомогою контрольованого спалювання в вимірювальному реакторі. Блок схема алгоритму наведена на рисунку 4.7

Після ініціалізації системи, що означає виконання всіх підготовчих процедур, система починає обслуговувати виконання всіх процедур по чергово. Для рішення цієї задачі програма центрального процесора системи виконує нескінченний цикл, протягом якого по чергово виконуються всі підпрограми.

Окремо слід зазначити, що ідентифікація збурення (значна зміна складу соломи), і відповідне переналаштування регулятора виконується за методом, описаним в [6].

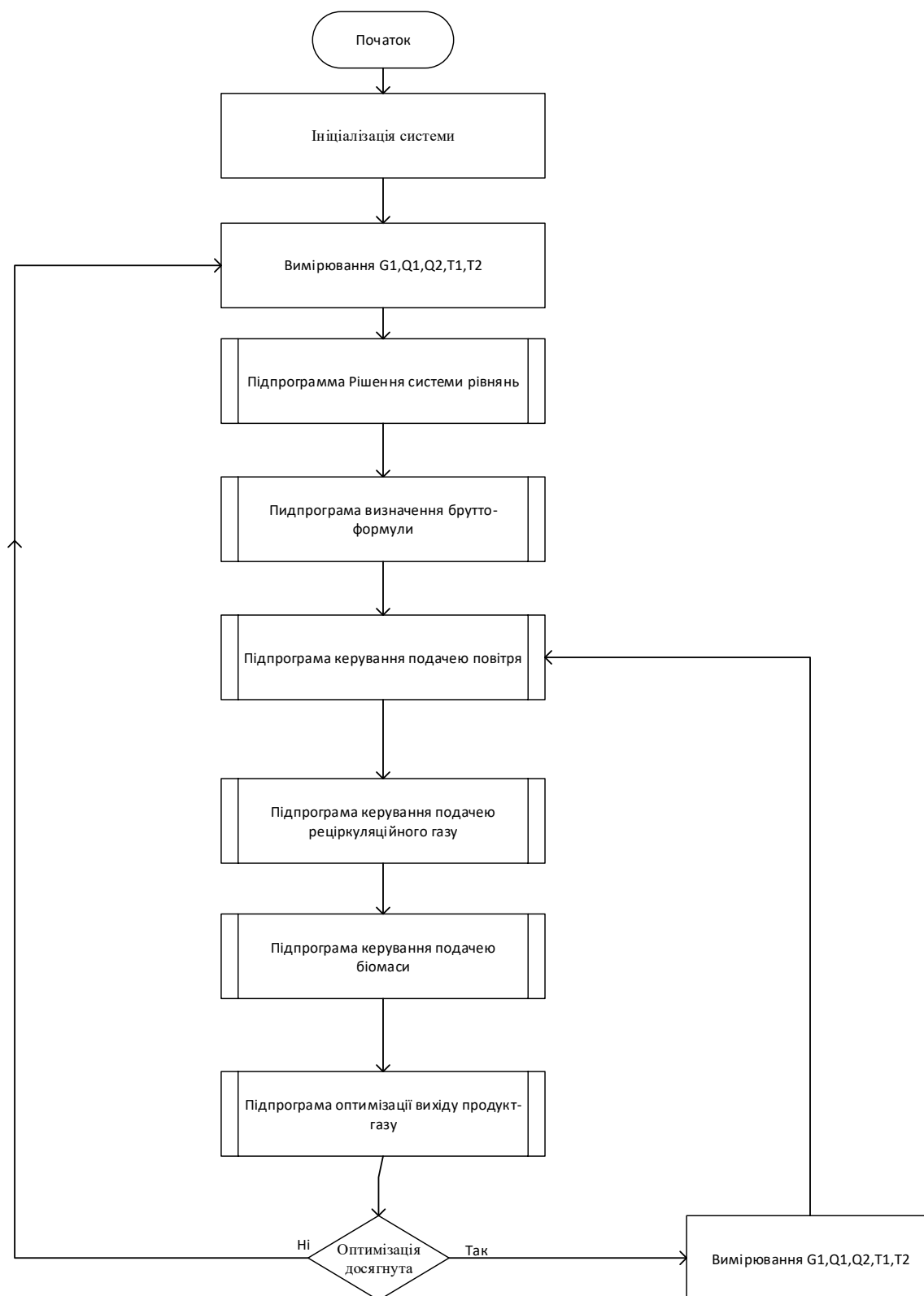


Рис. 4.7 Загальний алгоритм системи.

4.5. Висновок до четвертого розділу

1. Розроблено метод визначення складу соломи, яка проходить процес піролізу в реальному часі.

2. Розроблено інтегровану комп'ютерну систему керування піролізом, що вирішує наступні задачі – керування процесом зпалювання синтез-газу в тестовому реакторі з забезпеченням коефіцієнту надлишку окислювача рівному 1; ідентифікація складу соломи, що піролізується; визначення оптимальних параметрів для піролізу біомас – а саме оптимальних витрат синтез газу, що подається на реверс, температури, витрат окисника(повітря). Розроблені вузли та підсистеми, що вирішують вищенаведені задачі об'єднано в єдину інтегровану систему, що забезпечує найвищий можливий показник калорійності синтез-газу, а також стабілізує даний показник без необхідності використання калориметра реального часу.

3. Проаналізовано й наведено шляхи вирішення інженерних задач і викликів - як програмних так і апаратних, що виникають при безпосередній імплементації системи керування складним хімічним процесом в реальному часі, як неточність датчиків, шуми в каналах вимірювання, налагодження надійного зв'язку між вузлами та підсистемами інтегрованої комп'ютерної системи.

4. Проаналізовано вплив неточностей вимірювання й неточностей виконуючих механізмів на загальну працездатність і точність алгоритмів і законів управління, описаних в главах 2 і 3. Встановлено, що задача точного вимірювання температури є найкритичнішою з усіх інженерних задач, адже саме вимірювання температури дозволяє визначити склад біомаси, що проходить процес піролізу, а інформація про склад біомаси є ключовою при визначенні оптимальних параметрів піролізу.

Розроблено програмно-апаратний метод точного вимірювання температури, що дає надзвичайно низьку похибку вимірювань – 0.05 %, що дозволяє з високою вірогідністю точно визначати склад біомаси, що піролізується. Це, в свою чергу, дозволяє забезпечувати коливання значення теплотворної здатності синтез-газу в рамках $\pm 1\%$

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота містить отримані автором нові науково обґрунтовані результати, що складаються з удосконалених методів і моделей комп'ютерно-інтегрованої системи керування установкою піролізу відходів агротехнологій, що використовує відновлювальні джерела енергії, які підвищили стабільність параметру теплотворної здатності утвореного синтез-газу. Така КІСУ компенсує збурення складу відходів агропромислових технологій. Це робить можливим переміщення таких установок в клас регульованих. Отримані результати дозволяють зробити такі висновки:

1. Розвинуто метод визначення складу відходів агропромислових технологій в реальному часі під час процесу піролізу, що дало змогу оперативно змінювати параметри процесу піролізу, і таким чином забезпечувати стабілізацію теплотворної здатності отриманого синтез-газу. В свою чергу, така стабілізація дозволяє, теоретично, розширити сферу застосування установок піролізу відходів агропромислових технологій, а саме включити отриманий синтез-газ в існуючу енергоінфраструктуру, що може значно поліпшити стабільність енергетичного сектору. В процесі моделювання вдалося повністю компенсувати збурення. Так, коливання складу відходів агротехнологій у визначених межах не призводило до коливання значення теплотворної здатності синтез-газу більше 3%. Недоліком залишається невизначеність критичних меж коливань складу відходів агротехнологій, за яких стабільність вище вказаного параметру почне різко гіршати. Опрацювання цього питання потребує подальших досліджень.

2. Для уможливлення вибору найкращих технологічних параметрів процесу піролізу в рамках вирішуваної задачі було виконано наступне: класифікація видів соломи умовною брутто формулою, розроблена модель нечіткої кластеризації та класифікації видів соломи за брутто-формулою, розроблено модель керування, засновану на пропорційному законі керування, що використовує інформацію про склад речовини, що проходить процес піролізу. Об'єднані в єдину систему, такі моделі дозволяють формалізувати процес вибору технологічних параметрів,

насамперед температури піролізу, використовуючи статистичні дані, дані експериментальних досліджень.

3. Для моделі комп'ютерно-інтегрованого керування було розроблено метод мутацій функцій приналежності, що враховують зміну динамічних характеристик піролізної установки, що зумовлена різницею теплоємності і теплопровідності різних виів соломи. Такий метод забезпечує високий показник робастності системи керування, а саме низьке відхилення таких параметрів якості керування, як час регулювання та помилка керування під час зміни відповідних характеристик об'єкта керування на визначених межах.

4. Розроблено метод комп'ютерно-інтегрованого керування піролізом відходів агропромислових технологій (соломи) для забезпечення стабільного і високого значення теплотворної здатності синтез-газу за нанесення збурень складом вхідної сировини. Синтезовано комп'ютерно-інтегровано систему управління установкою піролізу, яка дозволяє стабілізувати технологічний процес отримання синтез-газу на заданих технологічних значеннях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. O. Brunetkin, M. V. Maksymov, A. Maksymenko, M.M. Maksymov (2019) Development of the unified model for identification of composition of products from incineration, gasification, and slow pyrolysis, *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, №4(6). С. 25-31(SCOPUS)
2. O. Brunetkin, Y. Dobrynin, A. Maksymenko, O. Maksymova, S. Alyokhina. Model and method of conditional formula determination of oxygen-containing hydrocarbon fuel in combustion (2020) *Energetika*. №6/8 (1). P. 77–84(SCOPUS)
3. O. Brunetkin, Y. Dobrynin, A. Maksymenko, O. Maksymova, S. Alyokhina. Inverse Problem Of The Composition Determination Of Combustion Products For Gaseous Hydrocarbon Fuel. (2020) *Computational Thermal Sciences: An International Journal*. P.477-489 (SCOPUS)
4. A. Maksymenko. Development of Control System for Waste Pyrolysis Unit of Agricultural Complex With the Application of Fuzzy Logic (2021) *Technology Audit and Production Reserves*, 4(2), P. 60.
5. M. Maksymov O. Brunetkin, A Maksymenko, O. Lysyuk. Mathematical model of determination of composition of mixture of hydrocarbonic acid-containing gases of combused fuel. (2019) *Вчені записки Таврійського університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, 29 (68), С 77–84.
6. А. Максименко. Побудова на нечіткій логіці комп'ютерної системи автоматичного управління об'єктом, що має обмежені обчислювальні й енергетичні ресурси. (2016) *Наукові праці Чорноморського державного університету імені Петра Могили комплексу Києво-Могилянська академія. Серія: Комп'ютерні технології*, 287(285) С. 83-88.
7. А. Максименко. Класифікація видів сільськогосподарських культур за умовною формулою для процесу піролізу. (2021) *Science, Theory and Practice Abstracts of International Scientific and Practical Conference*, Tokyo, Japan 2021 С.446-448

8. A. Maksymenko. Model of control for pyrolysis reactor for agricultural waste based on proportional control law. (2021) *Міжнародна науково-практична конференція «Наука, освіта, інновації та технології: стан, проблеми та перспективи розвитку»*. Збірник тез доповідей (Полтава 2021)
9. A. Maksymenko. Model of straw composition fuzzy clusterization and classification for selection of best technological parameters for pyrolysis. (2021) *Science, Theory and Practice. Abstracts of International Scientific and Practical Conference*, Tokyo, Japan 2021
10. A. Maksymenko. Method of approximate analytical solution of nonstationary heat transfer problem through heat exchange surface. (2021) *Modern science: innovations and prospects. Proceedings of the 2nd International scientific and practical conference*. SSPG Publish. Stockholm, Sweden. 2021. P. 21-27
11. Leichang Cao, Iris K.M. Yu, Xinni Xiong, Daniel C.W. Tsang, Shicheng Zhang, James H. Clark, Changwei Hu, Yun Hau Ng, Jin Shang, Yong Sik Ok. Biorenewable hydrogen production through biomass gasification: A review and future prospects (2020) *Environmental Research*, 2020.V.186, july. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109547>.
12. Chakraborty J.P., Singh S. Biomass Pyrolysis: Current Status and Future Prospects. (2021) *Bioenergy Research: Integrative Solution for Existing Roadblock. Clean Energy Production Technologies*:eds Srivastava M., Srivastava N., Singh R Springer. Singapore. 2021. URL:https://doi.org/10.1007/978-981-16-1888-8_3
13. Обсяг виробництва, урожайність та зібрана площа сільськогосподарських культур за їх видами по регіонах.(2018) *Держстат України:Архів* 2018. URL://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2018/sg/ovuzpsg/ Arh_ovuzpsg_u.html
14. Обсяг виробництва, урожайність та зібрана площа сільськогосподарських культур за їх видами по регіонах. (2020) *Держстат України:Архів*.2020.URL:http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2020/sg/ovuzpsg/Arh_ovuzpsg_2020_u.html

15. Ключ С. В. Визначення енергетичного потенціалу соломи і рослинних відходів за період незалежності України. (2012) *Відновлювана енергетика*. 2012 №3. С. 71–79.
16. Гелетуха Г.Г., Железна Т.А., Жовмір М.М., Матвеев Ю.Б., Дроздова О.І. Оцінка енергетичного потенціалу біомаси в Україні. Частина 1. Відходи сільського господарства та деревинна біомаса. (2010) *Промислова теплотехніка*. 2010. Т. 32. №5. С. 58–65
17. Cai, J., Wu, W., & Liu, R. Sensitivity analysis of three-parallel-DAEM-reaction model for describing rice straw pyrolysis. (2013) *Bioresource Technology*. 2013. 132, P.423–426. DOI:10.1016/j.biortech.2012.12.07
18. Kim, Daehwan. Physico-Chemical Conversion of Lignocellulose: Inhibitor Effects and Detoxification Strategies: A Mini Review. (2018) *Molecules*. 2018. V. 23.ed.2. P. 309. DOI:10.3390/molecules23020309.
19. Smuga-Kogut Małgorzata, Bychto Leszek , Walendzik Bartosz & Szymanowska-Powałowska Daria , Marecik Roman , Kobus-Cisowska Joanna, Grajek Katarzyna, Cielecka-Piontek, Judyta. Use of Buckwheat Straw to Produce Ethyl Alcohol Using Ionic Liquids. (2019) *Energies*. 2019, 12(10) URL:<https://www.mdpi.com/1996-1073/12/10/2014>
20. Neijat M.S., Gallagher J.R., Chemical composition and nutritive value of pea straw subjected to fungal fermentation. (1997) *Trop. Anita. Hlth Prod*, 1997, 4. P.216-218
21. Тепло с полей. Экономика сжигания соломы.(2001) *ММДеньги и Технологии*. 2001, Июнь.
22. Торбен Скотт. Производство энергии из соломы. (2011) *Положение технологии и инновации в Дании*. 2011. URL:<https://saf.org.ua/wp-content/uploads/2011/04/straw-to-energy-demark.pdf>

23. N. Lawrence Ricker. Model predictive control with state estimation. (1990) *Industrial & Engineering Chemistry Research* .1990. №29 (3).P. 374-382, DOI: 10.1021/ie00099a013
24. Mathieu J.L., Koch S.and Callaway D.S. State Estimation and Control of Electric Loads to Manage Real-Time Energy Imbalance. (2013) *IEEE Transactions on Power Systems*. 2013.V.28, № 1, P. 430-440, Feb. DOI: 10.1109/TPWRS.2012.2204074.
25. Шилкина С.В., Фокина Е.Н. Контроллер нечёткой логики в управлении технологическими процессами. (2018) *Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии*. 2018. Вып.15 (1 (59)).
26. Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю., Волкова Г.В., Панасенкова А.В., Зайцев В.А. Синтез каскадной системы управления тепловым режимом технологического объекта методами теории синергетического управления.(2019) *Вестник ИГЭУ*.2019. Вып. 3 С. 41–48.
27. Бирюлин Ю.С., Михалкин В.Н. Термодинамический Расчет Теплоты Сгорания Углеводородов. *Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии*. Вып.15 (1 (60)).
28. TTS Boilers Kompany URL :<https://www.ttsboilers.cz/ru/palivo-biomasa/>
29. Harst –Boilers. [URL:https://www.sproduct.com.ua/obladnannya/harst-boiler/kotli-na-biomasi/](https://www.sproduct.com.ua/obladnannya/harst-boiler/kotli-na-biomasi/)
30. Biomass Boiler Systems URL: <https://www.sproduct.com.ua/wp-content/uploads/2018/06/Optimize-Solid-Fuel-Combustion.pdf>
31. S. Czernik and A. V. Bridgwater. Overview of Applications of Biomass Fast Pyrolysis Oil. (2004) *Energy & Fuels* 2004 V.18 I. 2.P.590-598, DOI: 10.1021/ef034067u.
32. Anuradda Ganesh, Rangan Banerjee, Biomass pyrolysis for power generation — a potential technology. (2001) *Renewable Energy*. 2001.V. 22. I. 1–3. P. 9-14, , URL:[https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(00\)00026-4](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(00)00026-4)

33. Ukraine Final consumption. (2019) *International Energy Agency*. 2019. URL: <https://www.iea.org/sankey/#?c=Ukraine&s=Final%20consumption>
34. У Нацкомісії повідомили, скільки запущено «зелених» електростанцій. (2018) *Економічна правда*. 2018.10.01. URL: <https://www.epravda.com.ua/rus/news/2018/10/1/641130>
35. Desai J. Nelson M. Are we headed for a solar waste crisis? (2017) *Environmental progress* 2017.June.21 URL: <http://environmentalprogress.org/big-news/2017/6/21/are-we-headed-for-a-solar-waste-crisis>
36. Wade A. Carbon footprint of solar panels under microscope. *Euractiv*. URL: <https://www.euractiv.com/section/energy/opinion/mondaycop22-lower-co2-emissions-with-lower-carbon-solar-energy/1057375/>
37. Environmental Impacts of Wind Power. (2013) *Union of Concerned Scientists*. 2013. Mar.5 URL: <https://www.ucsusa.org/clean-energy/renewable-energy/environmental-impacts-wind-power>
38. CO2 emission of electricity from nuclear power stations. *Time of change*. URL: <https://timeforchange.org/co2-emission-nuclear-power-stations-electricity>
39. Margaret K., Mann and Pamela L. The Net CO2 Emissions and Energy Balances of Biomass and Coal-Fired Power Systems. *Spath National Renewable Energy Laboratory*. URL: <https://bioenergykdf.net/system/files/Net%20CO2...Coal-Fired%20Power.pdf>
40. GHG Emissions from the production of lithium-ion batteries for electric vehicles in China. (2017) *Energy Economics and Management* : selected Papers from 7th Annual Conference 4 April 2017. URL: https://www.researchgate.net/publication/316254101_GHG_Emissions_from_the_production_of_lithium-ion_batteries_for_electric_vehicles_in_China
41. Capital Cost Estimates for Utility Scale Electricity Generating Plants. (2016) *Independent Statistics & Analysis*. *Energy information administration*. 2016.

November. URL: https://www.eia.gov/analysis/studies/powerplants/capitalcost/pdf/cap_cost_assumption.pdf

42. Марков А., Орлова О. Как менялся климат на Земле за последние 800 тысяч лет. (2008) *Радио свобода*. 2008.14 ноября. URL: <https://www.svoboda.org/a/473123.html>

43. Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Лакомкин В.Ю. Энергоснабжения и выбросы парниковых газов (CO₂): уч. пособ. Санкт-Петербург:, 2014. 52 с. URL: <http://nizrp.narod.ru/metod/kpte/9.pdf>

44. Бондаренко А.В. Совершенствование управления факельным горением в котле. (2013) *Автоматизация судовых технических средств*: научн.-технич. сб. Одесса, 2013. Вып. 19. Одесса: ОНМА. С. 3–7.

45. Бондаренко А.В. Волков В.Э., Максимов М.В. Неустойчивость факельного горения. (2013) *Научные труды Одесской национальной академии пищевых технологий*. Одесса, 2013. Вып. 44. Том 1. С. 287-292.

46. Бондаренко А.В. Моделирование образования продуктов сгорания газообразного углеводородного топлива. (2013) *Судовые энергетические установки*. Одесса: 2013. Вып. 31. С. 178–187

47. Saletnik, B. , Bajcar, M. , Zaguła, G. , Czernicka, M. , Puchalski, C. Impact of the biomass pyrolysis parameters on the quality of biocarbon obtained from rape straw, rye straw and willow chips. (2016) *An International Quarterly Journal on Economics of Technology and Modelling Processes*. 2016. Vol. 5. No 2. p.139–143 URL: <http://ena.lp.edu.ua:8080/handle/ntp/33759>

48. Peng Fu, Song Hu, Jun Xiang, Lushi Sun, Sheng Su, Jing Wang, Evaluation of the porous structure development of chars from pyrolysis of rice straw: Effects of pyrolysis temperature and heating rate. (2012) *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2012. November. V. 98, P. 177-183, URL: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2012.08.005>.

49. Peng FU, Song HU, Jun Xiang, Lushi Sun, Tao Yang, Anchao Zhang, Junying Zhang, Mechanism Study of Rice Straw Pyrolysis by Fourier Transform Infrared Technique. (2009) *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2009. V. 17, I. 3. P. 522-529, , URL :[https://doi.org/10.1016/S1004-9541\(08\)60240-2](https://doi.org/10.1016/S1004-9541(08)60240-2)
50. Mario Lanzetta, Colomba Di Blasi, Pyrolysis kinetics of wheat and corn straw. (1998) *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 1998. V. 44, I. 2. P. 181-192. URL: [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(97\)00079-X](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(97)00079-X).
51. Enrique H. Ruspini, Numerical methods for fuzzy clustering. (1970) *Information Sciences*. 1970. V. 2. I. 3, P. 319-350, URL [https://doi.org/10.1016/S0020-0255\(70\)80056-1](https://doi.org/10.1016/S0020-0255(70)80056-1)
52. Enrique H. Ruspini, A new approach to clustering. (1969) *Information and Control*. V. 15. I. 1. 1969. P. 22-32. URL: [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(69\)90591-9](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(69)90591-9)
53. Aime H. Tchapda, Vijayaragavan Krishnamoorthy, Yaw D. Yeboah, Sarma V. Pisupati, Analysis of tars formed during co-pyrolysis of coal and biomass at high temperature in carbon dioxide atmosphere. (2017) *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2017. V. 128. P. 379-396. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2017.09.011>
54. Брунеткин А.И., Максимов М.В. Метод определения состава горючих газов при их сжигании. (2015) *Науковий вісник НГУ*. 2015. №5. С. 83-90 URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu_2015_5_16
55. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания: справочник: в 6 т. Под. ред. Акад. Глушко В.П. Т. 3: Топлива на основе кислорода и воздуха. М. ВИНТИ, 1973. 624 с.
56. Салганский Е.А., Фурсов В.П., Глазов С.В., Салганская М.В. , Манелис Г.Б. Модель паровоздушной газификации твердого горючего в фильтрационном режиме. (2006) *Физика горения и взрыва*. 2006. Т.42. № 1. С.65-72 URL: <https://docplayer.ru/86907583-Institut-problem-himicheskoy-fiziki-ran-chernogolovka.html>

57. Nadia H.L., Leibbrandt N.H., Aboyade A.O., Knoetze J.H. , Görgens J.F. Process efficiency of biofuel production via gasification and Fischer–Tropsch synthesis. (2013) *Fuel*. 2013. V. 109. P. 484–492. DOI.org/10.1016/j.fuel.2013.03.013
58. Салганский Е.А., Фурсов В.П., Глазов С.В., Салганская М.В. , Манелис Г.Б. Модель паровоздушной газификации твердого горючего в фильтрационном режиме. (2006) *Физика горения и взрыва*. 2006. Т.42. № 1. С.65-72
URL:<https://docplayer.ru/86907583-Institut-problem-himicheskoy-fiziki-ran-chernogolovka.html>
59. Matsevityi Yu.M., Alekhina S.V., Borukhov V.T., Zayats G.M., Kostikov A.O. Identification of the Thermal Conductivity Coefficient for Quasi- Stationary Two-Dimensional Heat Conduction Equations. (2017) *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2017. V. 90. No.6. P. 1295-1310, DOI 10.1007/s10891- 017-1686-7
60. Установка для визначення складу горючого газу в процесі його спалювання: пат. 120216 Україна. № а 2017 12785; заявл. 22.12.2017; опубл. 11.06.2018, Бюл. №11.
61. Лямин В.А. Газификация древесины М.: Лесная промышленность, 1967. 264 с.
62. Глушко В.П. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания: справочник : в 6 т. Под. ред. Акад. Глушко В.П. Т. 1. Методы расчета. М.: ВИНТИ, 1971. 266 с.
63. Брунеткин А. И., Давыдов В. О., Бутенко А. В., Лысюк А. П., Бондаренко А. В. Определение состава сжигаемого газа методом ограничений как задачи интерпретации модели. (2019) *Восточно-Европейский журнал передових технологій*. 2019. №3/6 (99). С. 22–30. DOI: 10.15587/1729–4061.2019.169219
64. O. Brunetkin, Y. Dobrynin, A. Maksymenko, O. Maksymova, S. Alyokhina. Model and method of conditional formula determination of oxygen-containing hydrocarbon fuel in combustion. (2020) *Energetika*. 2020. №6/8 (1). p. 77–84

65. A.P. Mouritz, Z. Mathys, A.G. Gibson, Heat release of polymer composites in fire, Composites Part A. (2006) *Applied Science and Manufacturing*. 2006.V. 37. I. 7, 2006, P.1040-1054. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.01.030>.
66. Vojtec Vesely, Danica Rosinov Robust MPC controller design for switched systems using muity-parameter dependent Lyapunov function. (2014) *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*. 2014. V. 10. № 1. February. P. 269–280
67. Quan Bu, Jin Cai, Yuanyuan Liu, Mengjie Cao, Lili Dong, Roger Ruan, Hanping Mao, The effect of fuzzy PID temperature control on thermal behavior analysis and kinetics study of biomass microwave pyrolysis. (2021) *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2021.V. 158. №105176. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105176>.
68. Böhler, L., Krail, J., Görtler, G., & Kozek, M. Fuzzy model predictive control for small-scale biomass combustion furnaces. (2020) *Applied Energy*. 2020. 276. № 115339. DOI: [10.1016/j.apenergy.2020.115339](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115339)
69. Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., Nadian, M. H., Davoodnia, V., & Soltanian, S. Prognostication of lignocellulosic biomass pyrolysis behavior using ANFIS model tuned by PSO algorithm. (2019) *Fuel*. 2019.V. 253P.189–198. DOI: [10.1016/j.fuel.2019.04.169](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.04.169)
70. Jang Tyng Bong, Adrian Chun Minh Loy, Bridgid Lai Fui Chin, Man Kee Lam, Daniel Kuok Ho Tang, Huei Yeong Lim, Yee Ho Chai, Suzana Yusup Artificial neural network approach for co-pyrolysis of Chlorella vulgaris and peanut shell binary mixtures using microalgae ash catalyst. (2020) *Energy*. 2020.V. 207 № 118289. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118289>.
71. Eckert E., Belohlav Z., Herink T. ANN modelling of pyrolysis utilising the characterisation of atmospheric gas oil based on incomplete data. (2007) *Chemical Engineering Science*. 2007. V. 62. I. 18–20. P. 5021-5025 DOI ;<https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.01.062>.

72. Kasmuri N.H., Kamarudin S.K., Abdullah S.R.S., Hasan H.A., A. Md Som Integrated advanced nonlinear neural network-simulink control system for production of bio-methanol from sugar cane bagasse via pyrolysis. (2019) *Energy*.2019. V. 168. P. 261-272. DOI :<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.056>.
73. Zhang B., Xu D.-I., Hu X.-d., y.Liu. Automatic control system of biomass pyrolysis gas carbon compound furnace based on PLC: *Mechanical Engineering and Intelligent Manufacturing (WCMEIM)* : proc. of 3rd World Conference , Shanghai, China, 4-6 Dec.2020. IEEE 23 Apr. 2021 P. 435-442, DOI: 10.1109/WCMEIM52463.2020.00098.
74. Xiangdong L., Shuyang W. , Xing L. Fuzzy self-tuning PID temperature control for biomass pyrolysis fluidized bed combustor. (2010) *Information Management and Engineering*: proc. of 2nd IEEE International Conference, ICIME ,Chengdu,China,16-18 Apr.2010, IEEE 03 June 2010. DOI:10.1109/ICIME.2010.5477837.
75. Bizon N., Thounthong P., Raducu M., M.Constantinescu L. Designing and modelling of the asymptotic perturbed extremum seeking control scheme for tracking the global extreme. (2017) *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. V. 42.I. 28. P. 17632-17644, DOI:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01.086>.
76. Bizon N., Kurt E. Performance analysis of the tracking of the global extreme on multimodal patterns using the Asymptotic Perturbed Extremum Seeking Control scheme. (2017) *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. V. 42. I. 28. P. 17645-17654. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.11.173>.
77. Aiken L.S., West S.G., Pitts S.C. Multiple linear regression, in: I.B. Weiner (Editor), *Hand B. Psychol.*, second ed., John Wiley , Sons, Inc. 2003. P. 511-541.
78. Tanaka K., Wang H.O. Fuzzy regulators and fuzzy observer: a linear matrix inequality approach. (1997) *Decision and Control*: Proc. of 36th IEEE Conference, San Diego,1997,23 Nov. 2002.P. 1315–1320

URL:<https://www.scilit.net/article/f689206c0f273b0da1c2c893101b0cab>

79. Tanaka K., Hori T., Wang H. O. A multiple Lyapunov function approach to stabilization of fuzzy control systems. (2003) *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2003. Aug.V.11 I.4. P. 582–589.
80. Черный, С.П., Сухоруков С.И., Манчук Д.А., Методы оценки устойчивости нечетких систем управления. (2014) *Информатика, вычислительная техника и управление Вестник ТОГУ Информатика, вычислительная техника и управление*. 2014. No 3(34) URL: <https://pnu.edu.ru/vestnik/pub/articles/1983/>
81. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. Питер, 2002. 608с.
82. Рабинер Л. Гоулд В.. Теория и применение цифровой обработки сигналов: пер. с англ. Москва, 1978. 868с.
83. Лосев В.В. Микропроцессорные устройства обработки информации. Алгоритмы цифровой обработки. Высшая школа. Минск, 1990. 132с.
84. Карташев В.Г. Основы дискретных сигналов и цифровых фильтров. Высшая школа. Москва, 1982. 109 с.
85. Смит С. Цифровая обработка сигналов: пер. с англ. ДМК Пресс. Москва 2018. 720 с.
86. Матвеев В.А. Метод приближенного решения систем нелинейных уравнений. (1964) *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.* 1964. Т. 4, № 6, 983–994. URL: http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=zvmmf&paperid=7693&option_lang=rus

ДОДАТОК А

Документи про впровадження



Юр. адреса: 65039, м. Одеса, вул. Канатна, буд.130 А, кв.70
 П/р 26006455011123, Банк АТ "ОТП Банк" м. Київ, МФО 300528
 Код ЄДРПОУ: 26567715
 ПІН: 265677115535
 Телефон: 0482-34-31-17

№ 9 від «30» 06.2021 р.

Ректору ДУ «Одеська Політехніка»
 проф. Оборському Г.О.

ТОВ «Аграрний інститут» впроваджує в в проектування піролізних установок результати дисертаційної роботи PhD здобувача кафедри «Комп'ютерні технології автоматизації» Максименка Андрія Олександровича на тему «Комп'ютерно інтегрована система управління піролізом відходами агротехнологій з визначенням складу синтез газу». Отримані результати роботи: а саме схема автоматизованої системи управління піролізом відходів агротехнологій показала можливості стабілізації високих значень теплотворної здатності утвореного синтез газу, що розширює можливу сферу використання синтез газу як палива у подальших технологічних процесах. Показано, що коливання теплотворної здатності синтез газу не перевищує 5% за умов коливання хімічного складу речовини, що піролізується у визначених межах.

Розроблена в дисертаційній роботі система автоматизованого керування установки піролізу прийнята за основу для проектування реального обладнання піролізу відходів агротехнологій потужністю 10 тонн на годину.

Директор



Дацюк Т. А.



ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ "УКРАГРО"

Юр. адреса: 65003, м. Одеса, вул. Чорноморського козацтва, буд.115
Р/р 26007001302348 в АТ "ОТП БАНК" МФО 300528
Код ЄДРПОУ: 32904793
ПН: 329047915541
Телефон: 067-481-71-30

№ 32 від «23» 06 2021 р.

Ректору ДУ «Одеська Політехніка»
проф. Оборському Г.О.

ТОВ "Украгро" впроваджує розроблені матеріали дисертаційного дослідження здобувача ступеню PhD Максименка Андрія Олександровича в виробничий процес, а саме технологічну схему стабілізації теплотворної здатності синтез газу отриманого методом піролізу відходів агротехнологій. Для стабілізації теплотворної здатності пропонується визначати склад сировини, що проходить процес піролізу, і забезпечувати відповідну реакцію системи керування.

Запропонована в роботі схема дозволяє стабілізувати теплотворну здатність утвореного синтез газу на високих значеннях. Схема включає в себе спеціально розроблений ізоентальпійний пристрій, в який подається незначна кількість синтез газу. Вимірюючи температуру згоряння синтез газу, за допомогою запропонованого алгоритму, визначається склад речовини, що проходить процес піролізу, і забезпечується відповідна реакція системи автоматизованого керування.

Директор



Усатенко Т.Д.



УКРАЇНА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
 MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
 ODESSA POLYTECHNIC STATE UNIVERSITY

 пр-т Шевченка, 1, м. Одеса-44, 65044 Україна
 тел.: +38 048 7223474, факс: +38 048 7221992

 Shevchenko ave., 1, Odessa-44, 65044 Ukraine
 phone: +38 048 7223474, fax: +38 048 7221992

 E-mail: opu@opu.ua <http://www.opu.ua>, Код ЄДРПОУ 43861328

 На № 25.06.21 № 234/41
ДОВІДКА

про використання результатів дисертаційної роботи

Максименка Андрія Олександровича

представленої на здобуття наукового ступеню

доктора філософії за спеціальністю

151 - Автоматизація та комп'ютерно інтегровані-технології

Надана довідка підтверджує, що матеріали дисертаційного дослідження Максименка А.О. «Комп'ютерно інтегрована система управління піролізом відходами агротехнологій з визначенням складу синтез газу» використовуються Державним університетом «Одеська політехніка» при викладанні дисциплін кафедрою «Комп'ютерні технології автоматизації»:

- Моделювання теплоенергетичного обладнання в АСУ;
- Динаміка теплових процесів;
- Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів;
- Структурна та параметрична оптимізація;

Довідка надана в зв'язку з захистом дисертації.

 Професор кафедри науково-педагогічної
 та виховної роботи


С.А.Нестеренко

 Вук. Брунеткін О.І.
 Тел.705-83-71

ДОДАТОК Б
Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковано основні результати дисертаційного дослідження:

1. O. Brunetkin, M. V. Maksymov, A. Maksymenko, M.M. Maksymov (2019) *Development of the unified model for identification of composition of products from incineration, gasification, and slow pyrolysis*, *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, №4(6). С. 25-31(SCOPUS)
2. O. Brunetkin, Y. Dobrynin, A. Maksymenko, O. Maksymova, S. Alyokhina. *Model and method of conditional formula determination of oxygen-containing hydrocarbon fuel in combustion* (2020) *Energetika*. №6/8 (1). P. 77–84(SCOPUS)
3. O. Brunetkin, Y. Dobrynin, A. Maksymenko, O. Maksymova, S. Alyokhina. *Inverse Problem Of The Composition Determination Of Combustion Products For Gaseous Hydrocarbon Fuel*. (2020) *Computational Thermal Sciences: An International Journal*. P.477-489 (SCOPUS)
4. A. Maksymenko. *Development of Control System for Waste Pyrolysis Unit of Agricultural Complex With the Application of Fuzzy Logic* (2021) *Technology Audit and Production Reserves*, 4(2), P. 60.
5. M. Maksymov O. Brunetkin, A Maksymenko, O. Lysyuk. *Mathematical model of determination of composition of mixture of hydrocarbonic acid-containing gases of combused fuel*. (2019) *Вчені записки Таврійського університету імені В.І. Вернадського*. Серія: Технічні науки, 29 (68), С 77–84.
6. А. Максименко. Побудова на нечіткій логіці комп'ютерної системи автоматичного управління об'єктом, що має обмежені обчислювальні й енергетичні ресурси. (2016) *Наукові праці Чорноморського державного університету імені Петра Могили комплексу Києво-Могилянська академія*. Серія: Комп'ютерні технології, 287(285) С. 83-88.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

7. А. Максименко. Класифікація видів сільськогосподарських культур за умовною формулою для процесу піролізу. (2021) *Science, Theory and Practice Abstracts of International Scientific and Practical Conference*, Tokyo, Japan 2021

C.446-448

8. A. Maksymenko. Model of control for pyrolysis reactor for agricultural waste based on proportional control law. (2021) *Міжнародна науково-практична конференція «Наука, освіта, інновації та технології: стан, проблеми та перспективи розвитку»*. Збірник тез доповідей (Полтава 2021)

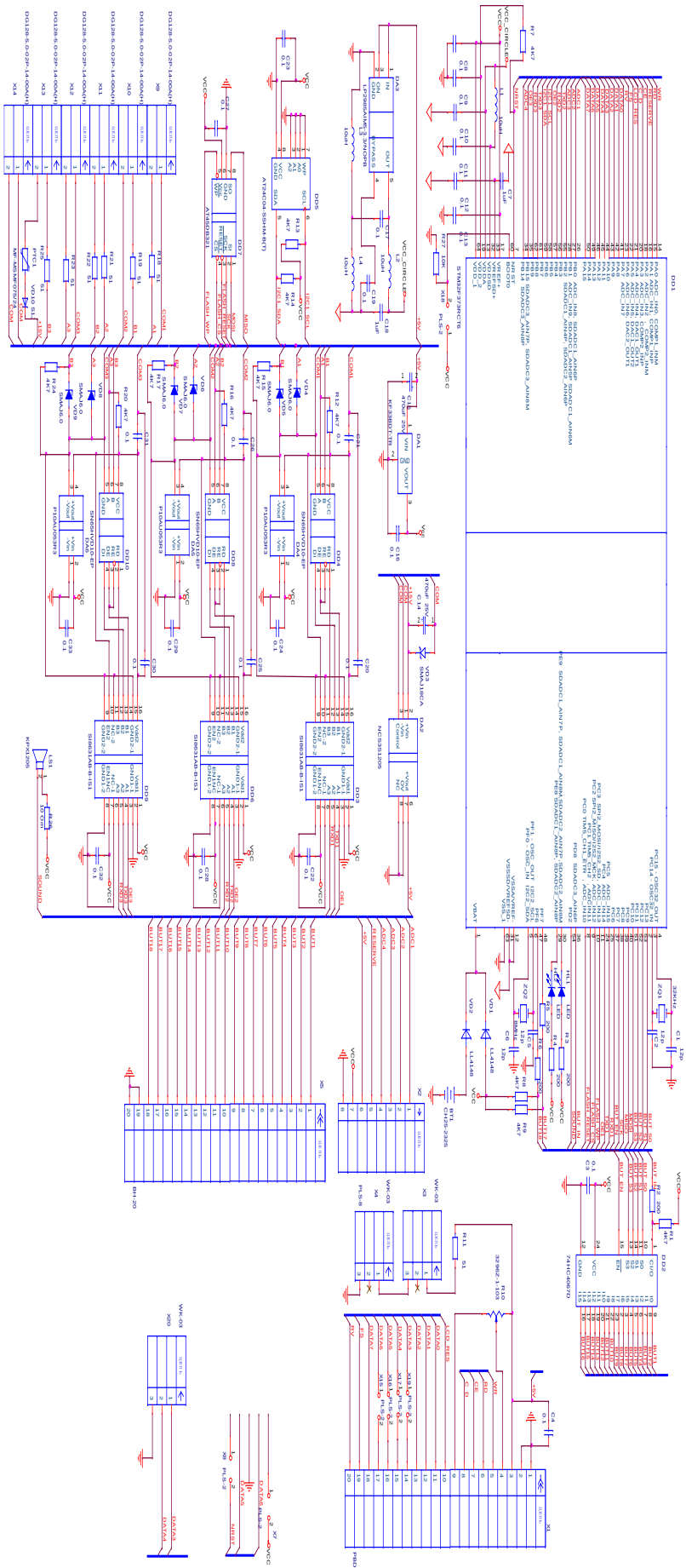
9. A. Maksymenko. Model of straw composition fuzzy clusterization and classification for selection of best technological parameters for pyrolysis. (2021) *Science, Theory and Practice. Abstracts of International Scientific and Practical Conference*, Tokyo, Japan 2021

10. A. Maksymenko. Method of approximate analytical solution of nonstationary heat transfer problem through heat exchange surface. (2021) *Modern science: innovations and prospects. Proceedings of International scientific and practical conference. SSPG Publish*. Stockholm, Sweden. 2021. P. 21-27

ДОДАТОК В1

**Схема з'єднань комп'ютерно інтегрованої системи управління
піролізною установкою**

ДОДАТОК В2
Схема підключення ЦП



ДОДАТОК В3

Блок вимірювання температури

ДОДАТОК В4
Драйвер двигуна

