

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЛИСЮК ОЛЕКСАНДР ВІКТОРОВИЧ

УДК 681.5: 621.18(043.3/.5)

ДИСЕРТАЦІЯ

**АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ КОТЛАМИ НА
ОСНОВІ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ЗМІННОГО СКЛАДУ
КИСНЕВМІСНОГО ВУГЛЕВОДНЕВОГО ПАЛИВА**

Спеціальність 05.13.07 – автоматизація процесів керування

Галузь знань: 15 – автоматизація та приладобудування

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

Науковий керівник – Максимов М.В. доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри комп'ютерних технологій автоматизації

Одеса – 2018

АНОТАЦІЯ

Лисюк О.В. Автоматизована система управління котлами на основі ідентифікації змінного складу кисневмісного вуглеводневого палива. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. – Одеський національний політехнічний університет МОН України, Одеса, 2018.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі модернізації автоматизованої системи управління паровим котлом за рахунок ідентифікації змінного складу кисневмісного вуглеводневого палива при експлуатації на будь-яких рівнях потужності.

В першому розділі «Стан питання автоматизованого керування котлами зі змінним складом вуглеводневого палива» зроблено наступне:

– проведено аналіз можливостей отримання несертифікованих кисневмісних вуглеводневих газів. Особливості експлуатації сучасних АСУ ТП для спалювання несертифікованих газів визначають завдання забезпечення якості регулювання. Гострота і важливість такого завдання визначається тим, що в даний час, на науковому рівні воно розроблено недостатньо, а на інженерному – вирішується інтуїтивно. При цьому практично відсутній науково-методичний апарат синтезу АСУ, який забезпечує ефективність експлуатації парових котлів при керуванні за станом структури об'єкту чи технологічного параметра;

– показано перспективність використання несертифікованих кисневмісних вуглеводневих газів у разі модернізації АСУ ТП, яка дозволить використовувати гази вторинного застосування не тільки з промислових підприємств, а й гази біотехнологічного походження;

– обґрунтовано структуру і сформульовано завдання дисертаційного дослідження, яке полягає у розробці моделі і методу визначення складу продуктів згорання кисневмісних вуглеводневих газів.

У другому розділі «Модель і метод визначення складу продуктів згорання кисневмісних вуглеводневих газів» отримано такі результати:

– розроблено математичну модель на підставі рівнянь для газоподібного палива, яка дозволяє визначити кількісний склад його умовної формули, ентальпію палива, склад продуктів згорання при використанні в якості вихідних даних величини замірних технологічних параметрів відомого якісного складу палива;

– математична точність моделі дозволяє використовувати отримані на її основі дані для оцінки чутливості результатів розрахунків на недосконалість вимірювального каналу вихідних технологічних параметрів;

– при вирішенні реальних технологічних задач ентальпії і ентропії продукти згорання мають визначатися якомога точніше на підставі таблиць або програмних комплексів. Поліноміальні залежності для визначення ентальпій і ентропій продуктів згорання, внаслідок значних похибок апроксимації, не можуть бути використані для вирішення розширеної задачі.

В третьому розділі «Вдосконалена система управління тепловим навантаженням барабанного котла для спалювання горючих кисневмісних вуглеводневих газів» виконано таке:

– під час досліджень знайдено можливість використання дешевого низькокалорійного кисневісного вуглеводневого газу в якості заміни природного газу на енергетичних і тепло-комунальних підприємствах України. Чисельні розрахунки показали, що одним з основних обмежуючих факторів по використанню дешевого палива без істотної модернізації енергетичного обладнання є пропускна здатність регулюючого органу;

– знайдено рішення проблеми, яке досягається шляхом підвищення тиску газу в газопроводі за допомогою компресора. Введення в технологічну схему газового компресора призводить до необхідності модифікації типової АСУ теплового навантаження;

– застосування методики класичної теорії автоматичного управління дозволило визначити вид передавальної функції пристрою зв'язку між

регулятором палива та компресором для одного котла, і встановити функціональну залежність для регулятора тиску в газопроводі, коли група котлів працює на загальний паропровід.

В четвертому розділі «Синтез системи управління навантаженням групи котлів, які працюють на загального споживача» досягнуто мети дисертаційної роботи, а саме:

– запропоновано критерій пошуку найкращого розподілу навантаження, який враховує не тільки теплову ефективність кожного котельного агрегату, але і ступінь його зносу. Було проведено моделювання роботи АСУ при подачі збурення зміною навантаження;

– пошук мінімуму функції-критерію наведено в режимі реального часу роботи АСУ ТП у зв'язку з тим, що час розрахунків на два порядки нижче, ніж час перехідних процесів.

– пошук мінімального значення здійснювався за допомогою алгоритму на основі модифікованого симплекс метод Нелдера-Міда, шляхом вибору управляючого впливу для зміни витрати палива в пальникових пристроях за рахунок використання компресора, що дозволило здійснити автоматизоване управління по тепловому параметру за рахунок збільшення витрати газу через регулюючий орган у разі відповідності прохідного перерізу пальників або за рахунок зміни структури обладнання у випадку такої невідповідності, що дозволило здійснити роботу енергетичного обладнання в найкращому режимі, який забезпечується тепловим коефіцієнтом досконалості і ступенем зносу.

– показано перевагу розробленої пошукової процедури в порівнянні з відомими.

Ключові слова: автоматизована система управління, передатна функція парового барабанного котла, ідентифікація складу суміші вуглеводневих кисневмісних газів, збурення по теплотворній здатності та густині, обмеження по пропускній здатності регулюючого органу, диференціальне рівняння динамічного навантаження котла.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Бондаренко А.В. Исследование высокотемпературного измерительного канала на основе хромель-алюминиевых термопар / А.В. Бондаренко, А.И. Брунеткин, **А.В. Лысюк** // Труды Одесского политехнического университета. – 2012. – Вып. 2 (39). – С. 268–272. (Журнал включено до НМБД Index Copernicus, CrossRef (DOI)).

2. **Lysiuk O.** Determining the transient process time by the example of bodies heating using a modified homochronicity number / **O. Lysiuk**, A. Brunetkin, M. Maksymov // Автоматизация технологических и бизнес-процессов. – 2016. – Vol. 8, Iss. 4. – P. 43–49. (Журнал включено до НМБД Index Copernicus, CrossRef (DOI), РИНЦ).

3. Brunetkin O.A simplified method for the numerical calculation of nonstationary heat transfer through a flat wall / O. Brunetkin, M. Maksymov, **O. Lysiuk** // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 2, Iss. 5 (96). – P. 4–13. (Журнал включено до НМБД SCOPUS, Index Copernicus, CrossRef (DOI)).

4. Maksymov M. Improvement of the control system over drum boilers for burning combustible artificial gases / M. Maksymov, V. Lozhechnikov, O. Maksymova, **O. Lysiuk** // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – No. 8 (88). – P. 10–16. (Журнал включено до НМБД SCOPUS, Index Copernicus, CrossRef (DOI)).

5. **Лысюк А.В.** Автоматизация распределения нагрузки между параллельно работающими котлами. / **А.В. Лысюк**, К.В. Беглов // Автоматизация технологических и бизнес-процессов. – 2017. – Том 9. – № 3, – С. 15–22. (Журнал включено до НМБД Index Copernicus, CrossRef (DOI), РИНЦ).

6. **Лысюк А.В.** Модель и метод сжигания в теплоэнергетической установке углеводородного газа переменного состава / **А.В. Лысюк**, А.В. Бондаренко, М.М. Максимов, А.И. Брунеткин // Автоматизация технологических и бизнес-процессов. – Т. 9, № 2 – С. 21–27. (Журнал включено до НМБД Index Copernicus, CrossRef (DOI), РИНЦ).

7. **Лысюк А.В.** Усовершенствование системы управления тепловой нагрузкой барабанного котла для сжигания горючих искусственных газов / **А.В. Лысюк** // Вісник ХНТУ.– 2017. – Т. 1, № 3 (62). – С. 180–185. (Журнал включено до НМБД Index Copernicus, CrossRef (DOI), РИНЦ).

8. Максимов М.В. Математическая модель определения состава смеси углеводородных кислородосодержащих газов сжигаемого топлива / М.В. Максимов, А.И. Брунеткин, А.А. Максименко, **О.В. Лысюк** // Вчені записки таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського серія "Технічні науки". Том 29(68) №1, 2018. с.77-84.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

9. **Лысюк А.В.** Усовершенствование АСУ барабанного котла для сжигания горючих искусственных газов / **А.В. Лысюк** // Автоматика 2017: XXIV Междунар. конф. по автоматич. управлению, 13–15 сентября 2017 г., г. Киев. – С. 88–89.

10. **Лысюк А.В.** Оптимизация работы группы котельных агрегатов при сжигании несертифицированного топлива / **А.В. Лысюк**, К.В. Беглов // Автоматика 2017: XXIV Междунар. конф. по автоматич. управлению, 13–15 сентября 2017 г., г. Киев. – С. 88–89.

11. Бондаренко А.В. Стенд для исследования динамики коэффициента излучения твёрдых тел при длительном нагреве / А.В. Бондаренко, А.И. Брунеткин, **А.В. Лысюк** // V Всеукр. научно-практич. конф.

«Информационные технологии и автоматизация–2012», 10–11 октября 2012 г., г. Одесса, ОНАПТ. – 3 с.

12. **Лысюк А.В.** Усовершенствование системы управления тепловой нагрузкой барабанного котла для сжигания горючих искусственных газов / **А.В. Лысюк** // XVIII Міжнар. конф. з математичного моделювання, присвячена 100-річчю з дня народження академіка Ю.О. Митропольського, 18–22 сентября 2017 г., с.м.т. Лазурне, ХНТУ. – С. 73–74.

13 Брунеткін, О.І. Визначення складу суміші горючих газів при їх спалюванні/ О.І. Брунеткін, **О.В Лисюк** // International research and practice conference «Modern methods, innovations, and experience of practical, application in the field of technical sciences». Radom, Republic of Poland December 27 – 28, 2017. Radom Academy of Economics. – P. 76 – 78.

14. . Брунеткин А.И. Усовершенствованная типовая система управления тепловой нагрузкой барабанных котлов / А.И. Брунеткин, А.А Максименко, **О.В. Лысюк** // Актуальные научные исследования в современном мире. Збірник наукових праць. Переяслав-Хмельницький. – 2018. – Вып. 2(34), часть 6. – С. 163–178.

ABSTRACT

Lysyuk O.V. Automated boiler control system based on the identification of the variable composition of the oxygen-containing hydrocarbon fuel.

Dissertation for candidate of technical sciences (Ph.D.) degree by specialty 05.13.07 – automation of control processes. Odessa National Polytechnic University of Ministry of Education and Science of Ukraine, Odessa, 2017.

The dissertation is devoted to solving the actual scientific and technical task of modernizing the automated control system of a steam boiler by identifying the variable composition of the oxygen-containing hydrocarbon fuel during operation at all levels of power.

In the first section "The state of the issue of the automated control of boilers with variable composition of hydrocarbon fuel" the following is done:

– the analysis of the possibilities of obtaining uncertified oxygen-containing hydrocarbon gases was conducted. The peculiarities of the operation of modern automated control systems for combustion of uncertified gases determine the tasks of ensuring the quality of regulation. The acuteness and importance of such a task is determined by the fact that at present, at the scientific level, it is not developed enough, and in engineering – it is solved intuitively. In this case, there is practically no scientific-methodical apparatus for synthesizing ACS which ensures the efficiency of the operation of steam boilers when managing the structure of an object or a technological parameter;

– the promising use of uncertified oxygen-containing hydrocarbon gases in the case of modernization of the control system of the technological parameter, which will allow the use of secondary gas not only from industrial enterprises, but also biotechnological origin gas, is shown;

– the structure is substantiated and the task of the dissertation research is formulated, which is to develop a model and method for determining the composition of products of combustion of oxygen-containing hydrocarbon gases.

In the second section "Model and method for determining the composition of combustion products of oxygen-containing hydrocarbon gases" the following results are obtained:

– the mathematical model is developed on the basis of equations for gaseous fuel, which allows to determine the quantitative composition of its conditional formula, enthalpy of fuel, composition of combustion products when using the value of the measured technological parameters of the known qualitative composition of fuel as the initial data;

– the mathematical accuracy of the model allows using the data obtained on its basis to evaluate the sensitivity of the calculation results to the imperfection of the measuring channel of the output process parameters;

– when solving real technological problems of enthalpy and entropy, combustion products should be determined as accurately as possible based on tables or software systems. Polynomial dependencies for the determination of enthalpies and entropy of combustion products, due to significant errors of approximation, can not be used to solve an extended task.

In the third section "The advanced control system of the heat load of a drum boiler for burning of combustible oxygen-containing hydrocarbon gases" is satisfied that:

– during researches it was found possible to use cheap low-calorie oxygen-containing hydrocarbon gas as a substitute for natural gas at power and heat utilities enterprises of Ukraine. Numerous calculations have shown that one of the main limiting factors for the use of cheap fuel without significant upgrade of power equipment is the capacity of the regulating element;

– the solution of the problem is achieved by increasing the gas pressure in the gas pipeline with the help of a compressor. Introduction to the technological scheme of the gas compressor leads to the need to modify the typical automated control system of heat load;

– application of the methodology of the classical theory of automatic control allowed to determine the type of transmission function of the communication device between the fuel regulator and the compressor for one boiler and to establish a functional dependence on the pressure regulator in the gas pipeline when a group of boilers operates on a general pipeline.

In the fourth section "Synthesis of the load control system of the group of boilers operating on the general consumer" goals of the dissertation work were achieved, namely:

– the criterion for finding the best load distribution is proposed that takes into account not only the heat efficiency of each boiler unit, but also the degree of its wear. A modeling of the work of the automated control system was carried out at the disturbance of a change in load;

– the search for the minimum of the criterion function is given in a real-time mode of the automated control system in connection with the fact that the settlement time is two orders lower than the time of transients;

– the search for the minimum value was carried out using the algorithm based on the modified Nelder-Mid's Simplex method by choosing the controlling influence to change the fuel consumption in the burner devices due to the use of the compressor. It enabled the automated control over the heat parameter by increasing the flow of gas through the regulatory element in the case conformity of the cross section of burners or due to changes in the structure of the equipment in case of such inconsistency, which allowed to work energetically the equipment in the best mode, which is provided with a heat coefficient of perfection and degree of wear;

– advantages of the developed search procedure compared with the known are shown.

Keywords: automated control system, transfer function of the steam drum boiler, identification of the composition of the mixture of hydrocarbon oxygen-containing gases, disturbance in terms of calorific value and density, restriction on the capacity of the regulating element, differential equation of boiler dynamic load.

LIST OF PUBLICATIONS

Publications where the main scientific results of the dissertation are published:

1. Bondarenko A.V. Issledovaniye vysokotemperaturnogo izmeritelnogo kanala na osnove khromel-alyuminiyevykh termopar / A.V. Bondarenko, A.I. Brunetkin, **A.V. Lysiuk** // Trudy Odesskogo politekhnicheskogo universiteta. – 2012. – Vol. 2 (39). – P. 268–272. (The journal is included in the Science Database Index Copernicus, CrossRef (DOI)).

2. **Lysiuk O.** Determining the transient process time by the example of bodies heating using a modified homochronicity number / **O. Lysiuk**, A. Brunetkin,

M. Maksymov // АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ. –2016. – Vol. 8, Iss. 4.– P. 43–49. (The journal is included in the Science Database Index Copernicus, CrossRef (DOI), RINC).

3. Brunetkin O.A simplified method for the numerical calculation of nonstationary heat transfer through a flat wall / O. Brunetkin, M. Maksymov, **O. Lysiuk** // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 2, Iss. 5 (96). – P. 4–13. (The journal is included in the Science Database SCOPUS, Index Copernicus, CrossRef (DOI)).

4. Maksymov M. Improvement of the control system over drum boilers for burning combustible artificial gases / M. Maksymov, V. Lozhechnikov, O. Maksymova, **O. Lysiuk** // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – No. 8 (88). – P. 10–16. (The journal is included in the Science Database SCOPUS, Index Copernicus, CrossRef (DOI)).

5. Lysiuk A.V. Avtomatizatsiya raspredeleniya nagruzki mezhdru parallelno rabotayushchimi kotlami. / **A.V. Lysiuk**, K.V. Beglov // Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh i biznes-protsessov. – 2017. – T. 9. – No. 3. – P. 15–22. (The journal is included in the Science Database Index Copernicus, CrossRef (DOI), RINC).

6. Lysiuk A.V. Model i metod szhiganiya v teploenergeticheskoy ustanovke uglevodorodnogo gaza peremennogo sostava / A.V. Lysiuk, A.V. Bondarenko, M.M. Maksimov, A.I. Brunetkin // Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh i biznes-protsessov. (The journal is included in the Science Database Index Copernicus, CrossRef (DOI), RINC).

7. Lysiuk A.V. Uovershenstvovaniye sistemy upravleniya teplovoy nagruzkoj barabannogo kotla dlya szhiganiya goryuchikh iskusstvennykh gazov / A.V. Lysiuk // Visnik KhNTU.– 2017. – Vol. 1. № 3 (62). – P. 180–185. (The journal is included in the Science Database Index Copernicus, CrossRef (DOI), RINC).

8. Maksimov M.V. Mathematical model for determining the composition of a mixture of hydrocarbon oxygen-containing gases of combustible fuel/ M.V. Maksimov, A.I. Brunetkin, A.A. Maksimenko, A.V. Lysyuk // Scientists note

Taurian National University. VI Vernadsky series "Technical sciences". Vol. 29 (68)
No.1, 2018. p.77-84.

Published works of approbatory character:

9. Lysiuk A.V. Uovershenstvovaniye ASU barabannogo kotla dlya szhiganiya goryuchikh iskusstvennykh gazov / A.V. Lysiuk // Avtomatika 2017: XXIV Mezhdunar. konf. po avtomatich. upravleniyu. 13–15 sentyabrya 2017, Kiyev. –

P. 88–89.

10. Lysiuk A.V. Optimizatsiya raboty gruppy kotelnykh agregatov pri szhiganiy nesertifitsirovannogo topliva / A.V. Lysiuk, K.V. Beglov // Avtomatika 2017: XXIV Mezhdunar. konf. po avtomatich. upravleniyu. 13–15 sentyabrya 2017, Kiyev. –

P. 88–89.

11. Bondarenko A.V. Stend dlya issledovaniya dinamiki koeffitsiyenta izlucheniya tverdykh tel pri dlitelnom nagreve / A.V. Bondarenko. A.I. Brunetkin. A.V. Lysiuk // V Vseukr. nauchno-praktich. konf. «Informatsionnyye tekhnologii i avtomatizatsiya–2012». 10–11 oktyabrya 2012, Odessa. ONAPT. – 3 p.

12. Lysiuk A.V. Uovershenstvovaniye sistemy upravleniya teplovoy nagruzkoy barabannogo kotla dlya szhiganiya goryuchikh iskusstvennykh gazov / A.V. Lysiuk // XVIII Mizhnar. konf. z matematychnoho modeliuvannia, prysviachena 100-richchiu z dnia narodzhennia akademika Yu.O. Mytropolskoho, 18–22 sentiabria 2017, Lazurne, KhNTU. – P. 73–74.

13. Brunetkin O.I. Vyznachennia skladu sumishi horiuchykh haziv pry yikh spaliuvanni/ O.I. Brunetkin, O.V Lysiuk // International research and practice conference «Modern methods, innovations, and experience of practical, application in the field of technical sciences». Radom, Republic of Poland December 27 – 28, 2017. Radom Academy of Economics. – P. 76 – 78.

14. Brunetkin A.I. Usovershenstvovannaya tipovaya sistema upravleniya teplovoy nagruzkoy barabannyih kotlov / A.I. Brunetkin, A.A Maksimenko, O.V. Lyisyuk // Aktualnyie nauchnyie issledovaniya v sovremennom mire. ZbIrnik naukovih prats. Pereyaslav Hmel'nitskiy. – 2018. – Vyip. 2(34), chast 6. – S. 163–178.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	16
ВСТУП.....	17
РОЗДІЛ 1. РОЗГЛЯД СТАНУ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ КОЛАМИ ЗІ ЗМІННИМ СКЛАДОМ ВУГЛЕВОДНЕВОГО ПАЛИВА.....	22
1.1 Аналіз складу горючих газів	23
1.1.1 Загальні положення про горючі гази штучного походження.....	23
1.1.2 Вуглеводневі гази природного походження.....	24
1.1.3 Горючі гази штучного походження	25
1.2 Математична модель визначення витрати продуктів згоряння.....	28
1.3 Методи і засоби підвищення ефективності АСУ ТП при управлінні енергогенеруючими установками	33
1.4 Постановка завдання дисертаційного дослідження	47
1.5 Висновки до першого розділу.....	52
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЬ І МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ СКЛАДУ ПРОДУКТІВ ЗГОРАННЯ КИСНЕВМІСНИХ ВУГЛЕВОДНЕВИХ ГАЗІВ	53
2.1 Математична модель визначення складу продуктів згоряння	53
2.2 Метод рішення модельної задачі	59
2.3 Перевірка працездатності моделі для визначення температури і складу продуктів згоряння кисневмісних горючих. Оцінка достовірності отриманих результатів	63
2.3.1 Визначення температури і складу продуктів згоряння етилового спирту в повітрі.....	64
2.3.2 Визначення температури і складу продуктів згоряння метано- повітряної суміші в повітрі	69
2.3.3 Визначення температури і складу продуктів згоряння метантенкових газів бродіння в повітрі.....	73
2.4 Висновки до другого розділу.....	78
РОЗДІЛ 3. УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕПЛОВИМ НАВАНТАЖЕННЯМ БАРАБАННОГО КОТЛА ДЛЯ	

СПАЛЮВАННЯ ГОРЮЧИХ КИСНЕВМІСНИХ ВУГЛЕВОДНЕВИХ ГАЗІВ.....	80
3.1 Аналіз існуючих схем управління і визначення можливості використання сучасних технічних засобів і алгоритмів керування для вирішення поставленого завдання.....	80
3.2 Визначення загальної структури об'єкта управління	87
3.2.1. Деталізація математичного опису типового об'єкта управління.....	89
3.2.1.1 Математичний опис технологічних ділянок і об'єкта управління..	90
3.2.1.2 Визначення структури пристрою зв'язку та принципової схеми управління.....	95
3.3 Порівняльний аналіз роботи групи барабанних котлів в регулюючому режимі з використанням удосконаленої системи управління тепловим навантаженням.....	98
3.4 Висновки до третього розділу.....	102
РОЗДІЛ 4. СИНТЕЗ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НАВАНТАЖЕННЯМ ГРУПИ КОТЛІВ, ЯКІ ПРАЦЮЮТЬ НА ЗАГАЛЬНОГО СПОЖИВАЧА.....	104
4.1 Обґрунтування зміни структури устаткування, що експлуатується при зміні складу палива.....	104
4.2 Математична модель об'єкта автоматизації.....	108
4.3 Алгоритм визначення умовної формули і ентальпії палива змінного складу в процесі його спалювання.....	110
4.4 Розробка алгоритму пошуку найкращого способу розподілу навантаження між котлами.....	118
4.5 Моделювання АСУ.....	127
4.6 Висновки до четвертого розділу.....	134
ВИСНОВКИ.....	136
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	139
ДОДАТОК А. Документи про впровадження.....	155
ДОДАТОК Б. Список публікацій здобувача.....	159

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АСР	–	автоматизована система регулювання
АСУ	–	автоматична система управління
АСУ ТП	–	автоматизована система управління технологічним процесом
ВЕР	–	вторинні енергоресурси
ГТУ	–	газо-турбінна установка
ДВЗ	–	двигун внутрішнього згоряння
ЕР	–	екстремальний регулятор
ККД	–	коефіцієнт корисної дії
МПС	–	метано-повітряна суміш
МУК	–	механізм управління компресором
ПЗ	–	пристрій зв'язку
РО	–	регулюючий орган
РРД	–	рідинний ракетний двигун
РВП	–	регулятор витрати повітря
САК	–	система автоматичного керування
ТЕС	–	теплова електрична станція
ТЕЦ	–	теплоелектроцентрально

ВСТУП

Актуальність теми. Впровадження енергоефективних технологій в Україні підвищує рівень вимог до функціональних характеристик автоматизованих систем управління (АСУ). Такі АСУ повинні вести управління технологічними процесами як при використанні сертифікованих вуглеводневих палив, так і при використанні вторинних енергоресурсів біоенергетики, нафтопереробки, та ін., за рахунок ідентифікації складу, який може змінюватись в часі.

Сучасні АСУ повинні надійно адаптуватися до зміни середовища їх використання з відсутністю або мінімізацією втручання оператора під час функціонування. Сучасний рівень досконалості АСУ дозволяє розв'язати нове завдання керування енергетичним обладнанням не тільки за параметрами, а й за зміною структури взаємозамінного обладнання. Сучасні АСУ не можуть забезпечити якість керування, якщо виникають одночасні внутрішні та зовнішні збурення, наприклад, зміна теплового навантаження споживача і складу палива.

Необхідність модернізації АСУ паровими котлами при спаленні кисневмісного вуглеводневого палива невідомого складу за рахунок його постійної ідентифікації і визначає актуальність даної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана відповідно до планів, затверджених Міністерством освіти і науки, є складовою частиною держбюджетної НДР за темою «Удосконалення теоретичних та експериментальних методів дослідження перехідних процесів в енергетичних установках, за рахунок структурної оптимізації моделей і технічних систем» (№ ДР 0115U000411) при особистій участі здобувача в якості співвиконавця.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є модернізація АСУ паровим котлом за рахунок ідентифікації складу кисневмісного вуглеводневого палива при експлуатації на будь-яких рівнях потужності.

Для досягнення мети поставлені такі задачі:

– проаналізувати способи отримання кисневмісних вуглеводневих газів змінного складу і особливості їх спалення та керування в парових котлах;

– розробити математичну модель для визначення складу суміші вуглеводневих кисневмісних газів в модельному представленні її умовною формулою з вихідними даними у вигляді вимірюваних технологічних параметрів: температури продуктів згоряння і об'ємних витрат горючої суміші і повітря;

– удосконалити математичну модель барабанного котла, яка враховує особливості роботи на загальний паропровід та залежну від теплотворної здатності і густини горючих кисневмісних вуглеводневих газів і обмежень по пропускній здатності регулюючого органу;

– синтезувати автоматизовану систему управління тепловим навантаженням групи барабанних котлів, що працюють на загальний паропровід, яка дозволяє компенсувати внутрішні збурення по складу і якості палива і зовнішні збурення зі зміни теплового навантаження за рахунок вибору режиму роботи кожного з котлів, що враховує їх знос.

Об'єкт дослідження: автоматизоване управління технологічним процесом спалення кисневмісних вуглеводних палив змінного складу в групі парових котлів, які працюють в нестационарних режимах на спільного теплового споживача.

Предмет дослідження: автоматизована система управління потужністю парових котлів у нестационарних режимах на основі ідентифікації складу палива.

Методи дослідження. Математичний аналіз дозволив визначити властивості аналізованих функцій; імітаційне моделювання підтвердило отримані теоретичні результати; моделювання зміни теплотворної здатності та густини вуглеводневого кисневмісного газу в залежності від якісного складу дозволило обґрунтувати застосування цих газів; моделювання нестационарних теплогідравлічних процесів, заснованих на законах збереження речовини,

Дальтона, хімічної рівноваги по парціальним тискам, засноване на рішенні системи нелінійних диференціальних рівнянь, дозволило врахувати вплив зміни параметрів на процес генерації пари; комп'ютерне моделювання перехідних процесів в парових котлах дозволило знайти максимальний рівень ефективності; комплексний аналіз складних технічних систем дозволив дослідити зміну характеристик парового котла в сталих і перехідних режимах; порівняльний аналіз пошукових методів дозволив обрати симплекс-метод Нелдера-Міда, що дозволило розраховувати керуючий вплив в режимі реального часу.

Наукова новизна:

– знайшов подальший розвиток метод моделювання повноти згорання палива за рахунок визначення ентальпії складу суміші вуглеводневих кисневмісних газів в модельному уявленні її умовною формулою за складом продуктів згорання в процесі спалення з повітряною сумішшю в ізоенальпійному пристрої. Метод заснований на використанні законів Дальтона, хімічної кінетики, збереження речовини і балансу максимальних валентностей окислювальних і відновних елементів, та відрізняється тим, що в співвідношенні балансу максимальних валентностей враховують окислювальні елементи, що містяться як в окиснювачі (повітрі), так і в пальному (вуглеводневому кисневмісному газі);

– знайшла подальший розвиток математична модель динамічного навантаження барабанного котла, яка враховує обмеження по пропускній здатності регулюючого органу та вплив теплотворної здатності і густини горючих кисневмісних вуглеводневих газів на генерацію перегрітої пари, що дозволило дослідити зміну характеристик парового котла в перехідних режимах;

– вперше вирішена задача автоматичного управління групою парових барабанних котлів в режимі реального часу, що використовують в якості палива ідентифіковані вуглеводневі кисневмісні гази змінного складу, за допомогою пошукового алгоритму на основі модифікованого симплекс методу Нелдера-Міда, шляхом вибору керуючого впливу для зміни витрати палива в пристроях

пальників за рахунок використання компресора. Це дозволило здійснити автоматизоване управління по тепловому параметру за рахунок збільшення витрати газу через регулюючий орган у випадку відповідності прохідного перетину пальників або за рахунок зміни структури обладнання в разі такої невідповідності, що дозволило здійснити роботу енергетичного обладнання в найкращому режимі, який забезпечується тепловим коефіцієнтом досконалості і ступенем зносу.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблені моделі і метод регулювання потужності, які є основою для модернізації АСУ будь-якою групою барабанних парових котлів з природною циркуляцією, характеризується використанням несертифікованих вуглеводневих палив, максимальною температурою горіння палива і мінімальними викидами продуктів горіння в навколишнє природне середовище. Така модернізація дасть можливість одночасного використання природного і штучних горючих газів в якості палива для барабанних котлів, за рахунок удосконаленої системи управління тепловим навантаженням барабанних котлів для регулюючого і базового режиму роботи.

Результати роботи впроваджено в навчальний процес ОНПУ кафедри Комп'ютерних технологій автоматизації в дисциплінах «Моделювання теплоенергетичного обладнання в АСУ», «Динаміка теплових процесів», «Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів».

Особистий внесок здобувача. Всі наукові результати, наведені в дисертації, отримані автором самостійно. У наведених публікаціях здобувачем зроблено наступне: в співвідношенні балансу максимальних валентностей враховуються окислювальні елементи, які містяться в повітрі і в вуглеводневому кисневмісному газі для забезпечення повноти згоряння палива [6,8,13]; обмеження по пропускній здатності регулюючого органу враховується вплив теплотворної здатності і густини горючих кисневмісних вуглеводневих газів за рахунок введення моделі компресора [7,9,8]; досліджено зміну характеристик парового котла в сталих і перехідних режимах для визначення

зв'язку вихідних і вхідних параметрів [2,3,4,10]; здійснено автоматизоване управління по тепловому параметру за рахунок збільшення витрати газу через регулюючий орган у випадку відповідності прохідного перетину пальників [1, 11,12]; здійснено автоматизоване управління за рахунок зміни структури обладнання, що дозволило здійснити роботу енергетичного обладнання в найкращому режимі, який забезпечується тепловим коефіцієнтом досконалості і ступенем зносу[5,8].

Апробація результатів роботи. Результати дисертаційного дослідження доповідалися, обговорювалися і отримали схвалення на міжнародних науково-практичних конференціях і семінарах: V Всеукр. науково-практич. конф. «Інформаційні технології та автоматизація» (Одеса, 2012 р.) ОНАХТ; XXIV Міжнародній конференції з автоматичного управління «Автоматика 2017» (Київ, 2017); XVIII Междунар. конф. з математичного моделювання, присвяченої 100-річчю з дня народження академіка Ю.О. Митропольського, (Херсон 2017); Міжнародній науково-практичній конференції «Modern methods, innovations, and experience of practical, application in the field of technical sciences» (Radom, 2017).

Публікації. Результати наукових досліджень опубліковані в 14 друкованих працях, з них 7 – у спеціалізованих наукових виданнях (2 публікації – у міжнародній науково метричній базі SCOPUS), 5 тез доповідей міжнародних, національних конференцій, 1 патент України на винахід.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел з xx найменувань й 2 додатків. Загальний обсяг роботи становить xx сторінку. До роботи також входять xx рисунка й xx таблиця.

РОЗДІЛ 1

РОЗГЛЯД СТАНУ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ КОЛАМИ ЗІ ЗМІННИМ СКЛАДОМ ВУГЛЕВОДНЕВОГО ПАЛИВА

Сучасному інноваційному суспільству властиво забезпечення його паливно-енергетичними ресурсами з максимальним ефектом при мінімумі капітальних витрат. Ефективність отримання і перетворення паливно-енергетичних ресурсів враховує екологічну складову і всі можливі ризики, які впливають на кінцеву енергоємність [15].

Поточні значення питомих енергетичних показників сукупного національного доходу України в разі перевищують аналогічні показники країн Євросоюзу. Причина такого становища визначається не тільки технологічною відсталістю паливно-енергетичного комплексу та житлово-комунального сектора національної економіки, а й постійним орієнтуванням національної економіки України в минулому на ринки, які слабо розвинуті [16; 17].

У паливному балансі України широкого поширення набули газо-мазутні котли і штатні системи їх автоматичного регулювання. Барабанні котли середньої потужності з природною циркуляцією мають високі показники енерговиділення топкового простору, невеликі габаритні розміри і капітальні витрати. Такі парові котли експлуатуються з мінімальним надлишком повітря в топці, показники якості регулювання знаходяться на прийнятному рівні. Ці котли знайшли широке застосування на підприємствах України неенергетичного профілю, де, відповідно до технології виготовлення основної продукції, потрібна перегріта або насичена пара [18].

Застосування несертифікованих енергоресурсів, якісний склад яких змінюється в часі, робить неможливим їх спалювання з регламентованим виходом продуктів згоряння. В процесі експлуатації енергетичних установок

на якісно різних видах палива виникає потреба забезпечення проектних характеристик в залежності від вимог технологічного процесу.

Перший розділ дисертаційної роботи спрямований на аналіз можливого складу вуглеводневих газів, можливість моделювання продуктів згоряння таких газів при невідомому складі. Крім цього, розглядається питання використання засобів автоматичного регулювання промисловими котлами в разі їх експлуатації на такому паливі.

1.1 Аналіз складу горючих газів

1.1.1. Загальні положення про горючі гази штучного походження

В якості палива можливо використовувати горючі гази штучного походження, які отримують під час роботи різних технологічних установок. Найбільшого поширення набули горючі гази від коксового вугілля, які виготовляються для металургійного виробництва. Це – коксовий і генераторний гази. При переробці нафти утворюються вуглеводневі гази та гази, що містять водень. Їх розглядають як вторинні енергоресурси (ВЕР), а їх утилізація вирішує завдання раціонального і ефективного енергозабезпечення.

Використання в якості палива газів штучного походження, склад і теплотехнічні властивості яких змінюються в часі випадковим чином, робить неможливим управління спалюванням стандартними засобами автоматичного регулювання економічно доцільним і екологічно безпечним.

Робота енергетичних установок, що виробляють пар, при автоматичному регулюванні змінних режимів на різних видах палива, вимагає забезпечення відповідності температурних характеристик факела вимогам технологічних процесів. У цих умовах найбільш вигідне рішення – вибір пальника з регульованими параметрами як по повітряному, так і по газовому тракту. Використовуючи такі пальники, можна забезпечити оптимальний тепловий режим незалежно від навантаження або виду палива. Включення

таких пальників в автоматизоване регулювання значно підвищує економічність і надійність енергетичних установок.

Крім того, утилізація несертифікованих газів природного і штучного походження ставить додаткове завдання їх максимальної утилізації, яке в літературі розглянута недостатньо. При повному згорянні природного газу продуктами згоряння є CO_2 , N_2 , пари H_2O . Якщо в продуктах згоряння міститься O_2 , то воно відбувається з надлишком повітря. Продуктами неповного згоряння можуть бути також CO , H_2 , CH_4 , важкі вуглеводневі гази, сажа. Тому, на етапі аналізу, доцільно розглянути їх склад і теплотворну здатність.

1.1.2 Вуглеводневі гази природного походження

Природні горючі гази (природний і сланцевий гази, шахтний метан, гази факельних викидів) – газоподібні вуглеводневі гази, які складаються в основному з суміші метану, етану, пропану, бутану, іноді містять домішки CO , N_2 , рідин, що мають низьку температуру кипіння, пентану, гексану, можливо вміст баластних негорючих газів і вологи. Склад газів природного походження відрізняється один від одного різною молекулярною вагою, яка лежить в межах від 15 до 22 одиниць [19].

Склад природного газу: CH_4 – 88,35 %, C_2H_6 – 5,26 %, C_3H_8 – 2,29 %, *i*- C_4H_{10} – 0,19 %, *n*- C_4H_{10} – 0,33 %, *i*-, *n*- C_5H_{12} – 0,09 %, *i*-, *n*- C_6H_{14} – 0,05 %, N_2 – 1,96 %, CO_2 – 1,48 %. Густина газу – 0,782 кг/м³. Нижча теплота згоряння – 35,5 МДж/м³, температура полум'я в суміші з киснем – 2100 °С.

Шахтний метан для закритих шахт CH_4 – 68,6...76,0 %; C_nH_m – 0,9...2,6 %; CO_2 – 11,3...10,6 %; N_2 – 18,9...10,7%; O_2 – 0,5...0,1 %, нижча теплота згоряння – 6900...8200 ккал/м³. Для шахт, які знаходяться в експлуатації, склад: CH_4 – 43,8...31,5 %; C_nH_m – 0,4...0,5 %; CO_2 – 2,2...31,7 %;

N_2 – 43,9...31,7 %; O_2 – 9,8...5,8 %, нижча теплота згоряння – 18,9...12,9 МДж/м³.

Склад сланцевого газу: CH_4 – 14...17 %, H_2 – 25...40 %, C_nH_m 4...5 %, N_2 – 22...25 %, CO – 10...20 %, CO_2 – 10...20 %. Густина газу – 0,74...0,93 кг/м³. Теплота згоряння сланцевого газу складає 8,4...9,2 МДж/м³, температура полум'я в суміші з киснем – 2000 °С.

Склад газу факельних викидів: CH_4 – 66...84 %, C_2H_6 – 2...14 %, C_3H_8 – 5...12 %, *i*-, *n*- C_4H_{10} – 1...5 %, *i*-, *n*- C_5H_{12} – 0,5...1,5 %, *i*-, *n*- C_6H_{14} – 0,2...0,5 %, CO_2 – 0,1...2,6 %, N_2 – 0,1...2,0 %, густина – 0,94...1,17 кг/м³. Теплота згоряння газу факельних викидів складає 44,5...47,7 МДж/кг.

1.1.3 Горючі гази штучного походження

Штучні горючі гази отримують з кам'яного і бурого вугілля, торфу, горючих сланців [20], при прямій перегонці нафти, термічному і каталітичному крекінгу, а також при вісбрекінгу чорних нафтопродуктів, а також з деревини, рослинної маси, відходів тваринництва [21; 22].

Під час коксування газів вугілля з 1 т вугілля вихід коксу складає 750...800 кг, коксового газу – 175...140 кг або (350...280 м³) і кам'яновугільної смоли – 25...40 кг. Проаналізуємо основні гази, які одержують при коксуванні вугілля, і їх якісну міру [23].

Якісною мірою використання горючих газів є їх жарова продуктивність. В першу групу якості потрапляють гази з малим вмістом баласту і жаровою продуктивністю вище 2000 °С. Ці гази дозволяють створювати високотемпературні технологічні процеси. До них відносяться:

– коксовий газ з кам'яного вугілля наступного складу: H_2 – 58 %; CH_4 – 25 %; C_nH_m – 2 %; CO – 7 %; CO_2 – 3 %; O_2 – 0,2 %; N_2 – 4 %, нижча теплота згоряння – 18 МДж/м³, жарова продуктивність – 2090 °С;

– коксовий газ з сланців наступного складу: H_2 – 38,6 %; CH_4 – 23,7 %; C_mH_n – 5,7 %; CO – 10,9 %; CO_2 – 18,8 %; O_2 – 0,3 %; N_2 – 2 %, нижча теплота згоряння – 20,1 МДж/м³, жарова продуктивність — 2100 °С;

– генераторний газ парокисневий наступного складу: H_2 – 59,1 %; CH_4 – 9,85 %; C_nH_m – 1,027 %; CO – 21,2 %; CO_2 – 1,9 %; O_2 – 0,3 %; N_2 – 2,25 %, нижча теплота згоряння – 13,7 МДж/м³, жарова продуктивність – 2150 °С;

– генераторний газ водяний наступного складу: H_2 – 48,0 %; CH_4 – 0,5 %; CO – 38,5 %; CO_2 – 6 %; O_2 – 0,2 %; N_2 – 6,4 %, нижча теплота згоряння – 10,5 МДж/м³, жарова продуктивність – 2180 °С [24].

Гази другої групи якості містять від 20 до 70 % негорючих газів. Вони можуть забезпечити жарову продуктивність на рівні від 1500 до 1800 °С. Ці гази необхідно використовувати в середньо- і низькотемпературних процесах. До таких газів відносять:

– генераторний газ пароповітряний з бурого вугілля наступного складу: H_2 – 13 %; CH_4 – 2 %; C_nH_m – 0,3 %; CO – 30 %; CO_2 – 5 %; O_2 – 0,2 %; N_2 – 50,4 %, нижча теплота згоряння – 6,1 МДж/м³, жарова продуктивність – 1720 °С;

– доменний газ наступного складу: H_2 – 2,7 %; CH_4 – 0,3 %; CO – 28 %; CO_2 – 10,5 %; N_2 – 58,5 %, нижча теплота згоряння – 3,9 МДж/м³, жарова продуктивність – 1470 °С.

Третя група якості забезпечується газами, що містять більш ніж 70 % негорючих газів і тих, що мають жарову продуктивність нижче 1200 °С. До них відноситься газ підземної газифікації бурого вугілля наступного складу: H_2 – 18 %; CH_4 – 1 %; CO – 8 %; N_2 – 71,2 %, нижча теплота згоряння – 3,6 МДж/м³, жарова продуктивність – 1200 °С [25].

Гази нафтопереробки мають високу жарову продуктивність і містять значну кількість вуглеводнів, тому в першу чергу представляють інтерес як сировина для отримання хімічних продуктів – поліетилену, поліпропілену. Теплота згоряння газів нафтопереробки коливається в широких межах: від 33,5 до 134,1 МДж/м³, а жарова продуктивність – від 2120 до 2190 °С. Середнє

її значення ($t_{\text{макс}}$) для газів нафтопереробки можна приймати рівним 2130 °С. Розрізняють наступні процеси переробки нафти: перегонка, термічний і каталітичний крекінг, вісбрекінг [26].

Перегонка нафти – процес термічного розподілу її на частини без помітного розкладання вуглеводнів. При перегонці нафти отримують вуглеводневий газ, який представляє собою наступну осереднену суміш: метан CH_4 – 20,7 %, C_2H_6 – 16,1 %, C_3H_8 – 36,1 %, $i-C_4H_{10}$ – 5,9 %, $n-C_4H_{10}$ – 14,6 %, $i-$, $n-C_5H_{12}$ – 6,3 %, H_2 – 0,3 %, густина газу – 1,726 кг/м³, теплота згоряння – 46,6 МДж/кг.

Термічний і каталітичний крекінг – процес деструктивної переробки нафти з метою отримання, головним чином, моторних видів палива і газів. Крекінг нафти прискорюється в присутності каталізаторів і при підвищенні тиску до 7 МПа. При крекінгу нафти вихід бензину збільшується до 40...70 %, а газу – до 10...20 %. Такі газу, що містять водень, характеризуються невисоким вмістом вуглеводнів і високим вмістом водню і являють собою наступну осереднену суміш: CH_4 – 6,9 %, C_2H_6 – 2,2 %, C_3H_8 – 0,7 %, $i-C_4H_{10}$ – 0,1 %, $n-C_4H_{10}$ – 0,3 %, $i-$, $n-C_5H_{12}$ – 0,2 %, H_2 – 89,6 %, густина газу – 0,178 кг/м³, теплота згоряння – 78,4 МДж/кг.

Для вісбрекінгу важкі нафтові фракції нагрівають приблизно до 700 °С, в результаті отримують 40...75 % рідких продуктів, газу – 10...12 % і залишок вісбрекінгу – 12...20 %. Такі газу багаті ненасиченими вуглеводнями і являють собою наступну осереднену суміш: CH_4 – 51,5 %, C_2H_6 – 23,6 %, C_3H_8 – 12,5 %, $i-C_4H_{10}$ – 0,8 %, $n-C_4H_{10}$ – 4,1 %, $i-$, $n-C_5H_{12}$ – 2,0 %, H_2 – 5,5 %, густина газу – 1,065 кг/м³, теплота згоряння – 48,1 МДж/кг.

При газифікації деревини склад продуктів піролізу лежить в широкому діапазоні і залежить від сировини і параметрів проведення газифікації, температури і тиску [27; 28].

Газ піролізу може мати наступний склад [29]: H_2 – 3...17 %; CH_4 – 0,2...3,5 %; C_mH_n – 0,2...0,7 %; CO – 8...29 %; CO_2 – 2,3...16 %; O_2 – 0,1...1,5 %;

N_2 – 44...55 %, нижча теплота згорання — 2,2...6,9 МДж/м³, жарова продуктивність – 835...1350 °С.

Біогаз – газ, що одержують метановим бродінням біомаси. Розкладання біомаси відбувається під впливом трьох різновидів бактерій. У ланцюжку харчування наступні бактерії використовують продукти життєдіяльності попередніх. Перший вид – бактерії гідролізні, другий – ті, що утворюють кислоту, третій – ті, що утворюють метан.

Склад біогазу: CH_4 – 55...75 %, CO_2 – 25...45 %, H_2 – 1...2 % та H_2S – 1...3 %, нижча теплота згорання - 2,1...4,4 МДж/м³, жарова продуктивність – 935...1450 °С, густина нормальна – 700...1200, кг/м³. Після очищення біогазу від CO_2 виходить біометан, що є повним аналогом природного газу, відмінність тільки в походженні [30].

Проведений аналіз складу і способів отримання несертифікованих газів в нафтопереробній та металургійній галузях промисловості, піролізу деревини і використання біотехнологій показує, що такі гази використовують для зниження енергетичної ємності власних технологій і практично не використовують для забезпечення вторинними енергетичними ресурсами інших споживачів через відсутність сталості калорійних параметрів.

Проведений аналіз технологій отримання несертифікованих вуглеводневих газів довів можливість їх використання для зниження залежності від вуглеводневого палива природного походження. В подальшому необхідно розглянути існуючі математичні моделі для газоподібного вуглеводневого палива, які дозволять визначити кількісний склад, ентальпію палива, склад продуктів згорання при використанні в якості вихідних даних величини заміряних витрат компонентів палива, відповідних їм температур.

1.2 Математична модель визначення витрати продуктів згорання

Для математичного моделювання продуктів згоряння розглянемо математичні моделі, які запропоновані в [31; 32], де в основу покладено відомі масові або об'ємні частки складових частин палива, а також їх хімічні формули. Для цього записується умовна формула палива у вигляді

$$A_{b_{1T}}^{(1)} A_{b_{2T}}^{(2)} \cdots A_{b_{iT}}^{(i)} \cdots A_{b_{mT}}^{(m)}, \quad (1.1)$$

де $A^{(i)}$ – символ i -го хімічного елемента; b_{iT} – кількість атомів i -го хімічного елемента в умовній молекулі палива.

Рівняння збереження речовини

$$\sum_q (a_{iq} \cdot n_q) = b_{iT}, \quad (1.2)$$

де q – кількість речовин в продуктах згоряння; b_{iT} – кількість атомів i -го виду в умовній молекулі палива; a_{iq} – кількість атомів цієї ж речовини в q -ій речовині продукту згоряння; n_q – кількість молей q -ої речовини в продуктах згоряння.

Для отримання рівнянь хімічної рівноваги в [33] запропоновано і в [31] використано варіант запису рівнянь збереження речовини у вигляді

$$\sum (a_{iq} \cdot P_q) = M_T \cdot b_{iT}. \quad (1.3)$$

Тут враховується M_T молей палива, кількість яких вибирається таким чином, щоб кількість молей (n_q) q -ої речовини в продуктах згоряння дорівнювала його парціальному тиску P_q . В цьому випадку M_T є додатковою невідомою величиною.

Враховуючи рівняння (1.3), закон хімічної рівноваги по парціальним тискам записується у вигляді

$$\frac{\prod P_i^{a'_{ij}}}{P_j} = K_j^0, \quad (1.4)$$

де P_j, P_i – парціальні тиски речовин в продуктах згоряння, відповідно залежних j і незалежних i ; a'_{ij} – стехіометричний коефіцієнт в реакції

хімічного рівноваги; K_j^0 – константа хімічної рівноваги по парціальним тискам.

Для визначення величини використовується закон Дальтона

$$\sum_q P_q = P, \quad (1.5)$$

де P – тиск суміші газів продуктів згоряння в топці котла (в камері згоряння, хімічному реакторі і т.д.).

Модель у вигляді рівнянь (1.3), (1.4), (1.5) застосовується в разі відомої умовної формули палива (1.1). У разі використання палива невідомого складу для визначення величин b_{it} вводять додаткові рівняння для того, щоб система стала невивірженою [34; 35].

Розглянуто рішення задачі для поширеної форми палива, пального і окиснювач якого знаходяться в газоподібному стані: окиснювач відомого складу, пального – газ або суміш газів невідомого складу [36]. Для газоподібного стану молярні об'єми будь-яких ідеальних речовин однакові. Через це, відношення об'ємних витрат пального і окиснювача рівні мольним відношенням в розглянутих реакціях горіння. Додаткове балансове рівняння для палива і продуктів згоряння з урахуванням (1.3) має вигляд

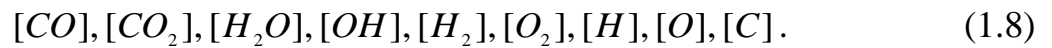
$$(I_G + \alpha \cdot \chi_0 \cdot I_O) \cdot M_T = \sum_q I_q \cdot P_q, \quad (1.6)$$

де α – коефіцієнт надлишку окиснювача; χ_0 – мольний стехіометричний коефіцієнт співвідношення компонентів; I_G, I_O, I_q – мольні ентальпії пального, окиснювача і газів в суміші продуктів згоряння.

Щоб застосувати рівняння (1.6) для знаходження декількох додаткових змінних, необхідно вимірювати об'ємні витрати окиснювача та пального ${}^{(1)}\dot{V}_O, {}^{(1)}\dot{V}_G$, а також температуру продуктів згоряння ${}^{(1)}T$, що відповідає цим витратам (верхній індекс ${}^{(1)}$). При цьому рівняння (1.6) записується як

$$\alpha \cdot \chi_0 = {}^{(1)}\dot{V}_O / {}^{(1)}V_G, \quad (1.7)$$

Визначемо кількості рівнянь в моделі. Якщо пальне складається з (n) елементів, то кількість нових невідомих становить $(n+1)$, так як, крім кількості атомів елементів в умовній формулі пального, необхідно визначити і його ентальпію I_T . Для цього необхідно записати $(n+1)$ рівняння виду (1.6). Кожному такому рівнянню відповідає свій вимір величин ${}^{(1)}\dot{V}_O, {}^{(1)}\dot{V}_T, {}^{(1)}T$ при спалюванні палива і варіюванні величини ${}^{(1)}\dot{V}_O$. При використанні вуглеводневого палива, що складається з $n=2$ елементів (вуглецю $[C]$ і водню $[H]$) з використанням кисню $[O]$ в якості окиснювача, як продуктів згоряння розглядають $q=9$ речовин:



Визначимо молекулярну масу газоподібного палива в вигляді

$$\mu_T = \frac{\dot{V}_0 \cdot \mu_0 + \dot{V}_2 \cdot \mu_2}{\dot{V}_0 + \dot{V}_2}, \quad (1.9)$$

де \dot{V}_0 – об'ємні витрати окиснювача, \dot{V}_2 – об'ємні витрати пального; μ_0 – молекулярна маса окиснювача; μ_2 – молекулярна маса пального.

Об'ємні витрати повинно привести до однакового тиску (наприклад, атмосферного) і однакової температури.

Умовну формулу пального записується у вигляді (1.1)

$$B_{b1z}^{(1)} B_{b2z}^{(2)} \cdots B_{b_{iz}}^{(i)} \cdots B_{bnz}^{(n)}, \quad (1.10)$$

де $B^{(i)}$ – символ i -го хімічного елемента в пальному; b_{iz} – кількість атомів i -го хімічного елемента в умовній молекулі пального; n – кількість символів хімічних елементів в умовній формулі пального.

З рівняння (1.7) молекулярна маса пального визначається як

$$\mu_z = \sum_{i=1}^n (\mu_i \cdot b_{iz}), \quad (1.11)$$

де μ_i – атомні маси елементів, що входять в умовну формулу пального.

З урахуванням значення M_T , що застосовується в рівнянні (1.3), маса палива, яка бере участь в реакції горіння, визначається співвідношенням

$$m_T = \mu_T \cdot M_T, \quad (1.12)$$

а маса продуктів згоряння в цій же реакції

$$m_{PC} = \sum_{j=1}^q (\mu_j^{PC} \cdot P_j). \quad (1.13)$$

Тут μ_j^{PC} – молекулярні маси речовин, що входять до складу продуктів згоряння.

Із закону збереження маси

$$m_T = m_{PC}, \quad (1.14)$$

та враховуючи рівняння (1.9) і умовну формулу (1.10) отримуємо

$$\mu_T \cdot M_T = \sum_{j=1}^q (\mu_j^{PC} \cdot P_j). \quad (1.15)$$

Якщо підставити в співвідношення (1.12) вираз μ_T для рівняння (1.6), а в нього вираз для μ_z рівняння (1.8), то кінцеве рівняння має вигляд

$$\frac{\dot{V}_0 \cdot \mu_0 + \dot{V}_z \cdot \sum_{i=1}^n (\mu_i \cdot b_{iz})}{\dot{V}_0 + \dot{V}_z} \cdot M_T = \sum_{j=1}^q (\mu_j^{PC} \cdot P_j). \quad (1.16)$$

Рівняння (1.13) служить замикаючим виразом до моделі [37; 38].

Аналіз представленої моделі показав, що її застосування для розглянутих в пункті 1.1 технологічних особливостей в разі відхилення складу сировини або зміни сировинної бази змінює параметри горючих газів. Це вносить істотні збурення в режими роботи енергетичних установок, в яких неможливо підтримувати задані характеристики витрати тиску пари засобами АСУ ТП.

Утилізація вторинних енергетичних ресурсів вирішує задачу мінімізації енергоємності продукції, яка випускається. Рішення цієї задачі ускладнюється технологічними особливостями енергогенеруючих установок. Тому, параметри газів штучного походження (щільність, енергоємність) значно змінюються в часі майже випадковим чином. Такі гази вносять збурення в режими роботи енергогенеруючих установок, які неможливо компенсувати навіть засобами АСУ ТП. Тому далі доцільно розглянути рішення, які були

застосовані в області автоматизації і керування для вирішення задачі, яка виникла.

1.3 Методи і засоби підвищення ефективності АСУ ТП при управлінні енергогенеруючими установками

Дослідженню процесів автоматизованого керування енергетичними установками в динамічних режимах при впливі збурюючих факторів, в тому числі і за складом палива, в даний час присвячено багато робіт. Істотний внесок у вирішення даної проблеми міститься в роботах В.А. Венікова [39], , Г.П. Плетньова [40], А.А. Полякова [41], В.Я. Ротача [42].

Цікавим є ряд робіт по вдосконаленню автоматизованих систем регулювання тепловим навантаженням парових котлів. Наприклад, розглядається АСР теплового навантаження барабанного котла при випадкових змінах витрат доменного та коксового газів і регулюючому впливі тільки на витрату природного газу [15]. Передбачається застосування компенсатора за основним збуренням – витраті доменного газу. Для підвищення ефективності системи запропоновано використовувати математичні моделі каналів об'єкта керування другого порядку з запізненням в поєднанні з розрахунком частотними методами параметрів регулятора, а також визначення структури і параметрів компенсатора з урахуванням статистичних характеристик збурень і застосуванням імітаційного моделювання. Наведено статистичні характеристики випадкового сигналу по витраті доменного газу на підставі експериментальних даних. Випадковий сигнал представлений у вигляді низькочастотної і високочастотної складових, визначено в моделі кореляційних функцій і спектральних густин. Наведено результати розрахунку оптимальної настройки контуру регулювання з регульованою змінною у вигляді сигналу по "теплу" з коливальним

обмеженням частотного показника і використанням трьох варіантів критерію якості регулювання: лінійного, квадратичного і інтегрального показників при ступінчастому збуренні і дисперсії помилки регулювання при випадковому збуренні по витраті доменного газу. Запропоновано вибрати структуру компенсатора у вигляді послідовного з'єднання двох частин, одна з яких відповідає оператору, оберненому до передавальної функції ПІ-регулятора, тобто у вигляді реальної ланки, яка може бути диференційованою. При цьому полегшується реалізація другої частини компенсатора з умови інваріантності, як при подачі компенсуючого сигналу на вхід об'єкта. Представлені результати імітаційного моделювання при дії випадкових збурень по витраті доменного газу.

Аналізуються основні завдання керування малими та середніми паровими котлами [43; 44]. Вказано на недоліки існуючих нормативно-технічних документів у частині сучасних вимог до якості керування котлами, а також недоліки традиційної концепції про процес спалювання палива, способів і алгоритмів керування котлами. Обґрунтовується підхід до створення системи керування, коли котел по каналах регулювання навантаження і економічності розглядається як нелінійний зв'язний об'єкт керування. Для регулювання навантаження і економічності роботи котла пропонується універсальна структурна схема, що передбачає можливість реалізації в сучасних контролерах як відомих методів, так і нового способу з використанням екстремального регулятора, що забезпечує мінімум витрат палива при заданому тепловому навантаженні котла.

Розглянута кореляційно-екстремальна система керування енергетичною ефективністю парових котлів, що дозволяє забезпечувати максимальний ККД згоряння палива в топці котла [45].

Досліджено каскадну систему підтримки рівня в барабані парового котла [46], яка відрізняється зміною структури системи управління в залежності від знаку зміни навантаження, щодо попереднього його значення,

а також введення блоку моделі обчислення рівня в барабані котла в залежності від витрати живильної води.

Розглянута САК водонагрівальним котлом, де в якості палива використовуються відходи нафтопродуктів [47]. Проведено аналіз основних видів теплогенераторів, що працюють на відпрацьованому маслі. Описано процес модернізації водогрійного котла для роботи на відпрацьованому маслі, також показані вимоги для розробки системи керування. Розроблено структурну схему системи управління і наведені особливості роботи системи і завдання, які виникали в процесі розробки. Встановлена залежність між подачею повітря і масла для стабільної роботи водогрійного котла і зроблено висновок, про те, що залежність між подачею повітря і масла впливає на час роботи водогрійного котла. Представлено алгоритм роботи водогрійного котла.

Розглянуто САК тепловим навантаженням прямоточного котлоагрегату енергоблока потужністю 300 МВт в маневрених режимах [48; 49]. Запропоновано функціональну структуру алгоритму керування інерційними теплоенергетичними об'єктами. Виконано ідентифікацію об'єкта керування з експериментальними даними і оцінкою стійкості системи регулювання в робочому діапазоні змін навантаження. Результати моделювання та випробувань показали, що введення динамічного коректора дозволяє досягти більш якісного регулювання при дії зовнішніх і внутрішніх збурень.

Наведено АСР теплового навантаження барабанного котла при спільно-роздільному спалюванні доменного, коксового та природного газів при випадкових змінах їх витрат [50; 51, 52]. Для підвищення ефективності АСР пропонується ввести ланцюги компенсації випадкових збурень за витратами цих газів на додаток до типової АСР, що використовує сигнал "по теплу". Наведено оцінки параметрів передавальних функцій каналів регулювання при різних співвідношеннях витрат спалюваних газів і навантаженнях котла. Викладено результати дослідження комбінованої системи і показано її ефективність при різних режимах роботи котла.

Розглянуто застосування на ТЕЦ системи керування тепловим навантаженням вугільного котла, який працює в схемі із загальним паропроводом [53; 54]. Запропоновано метод аналізу і отримано математичний опис об'єкта управління. Наведено результати дослідження класичних і адаптивних законів керування.

Розглядається задача побудови АСР витрати палива для вугільної ТЕЦ з поперечними зв'язками [55]. Пропонується математична модель об'єкту керування у вигляді діючої станції. Побудовано і досліджено керуючі програми для мікроконтролерів.

Представлено функціональну структуру системи автоматичного регулювання повітряним трактом водогрійного котла [56]. Наведено результати дослідження стійкості та якості роботи системи автоматичного розрядження в топці. Визначено структуру АСР і оптимальні значення параметрів налаштувань її регуляторів.

Відображено дослідження з регулювання температури перегрітої пари котлового агрегату [57]. Наведен опис регулювання температури перегрітої пари шляхом уприскування «власного» конденсату котлового агрегату. Представлено математичну модель регулювання температури перегрітої пари.

Запропоновано АСР основних параметрів парового котла теплової електростанції на основі багатовимірного чіткого логічного регулятора, яка дозволяє підвищити економічність процесу горіння [58]. Компенсація взаємовпливу контурів регулювання реалізована додатковою системою правил, які генерують функцію зв'язку контуру регулятора з іншими його контурами. Компенсуюча система отримана на основі експериментів на реальному об'єкті управління.

Розглядається автоматизована система управління пристроями пальників парового котла ТГМН-314 [59]. Відпрацьовано основні схемні, проектні та технічні рішення, а також алгоритми і програми керування цими пристроями. Показано шлях модернізації АСУ, який дозволяє спростити її структуру, підвищити швидкодію та ефективність.

Запропонована модель відноситься до систем керування паровими котлами і може використовуватися для автоматичного керування барабанними паровими котлами, зокрема для задач регулювання рівня води в барабані котла [60]. Модель розширює функціональні можливості системи в разі істотної зміни параметрів об'єкта і наявності збурень, при відносно простій реалізації контуру керування.

Наведено результати розробки, дослідження та впровадження вдосконалених систем автоматичного управління процесами спалювання палива [61]. Системи призначені для котельних установок і інших теплотехнічних агрегатів. Їх застосування дозволяє забезпечити максимальну ефективність використання палива і мінімізацію шкідливого впливу газів, що відходять в навколишнє середовище. Система управління забезпечує автоматичний пуск і зупинку котла, безперервний контроль технологічних параметрів, захист від аварійних режимів і регулювання подачі палива, повітря, розрідження в топці і (для парових котлів) рівня води в барабані.

Наведено дослідження задачі синтезу системи управління для прямого котла [62]. Розглядена спрощена модель одного з нагрівачів, для якого з урахуванням можливості вимірювання проміжної змінної пропонується формувати каскадне керування. Показано, що у внутрішньому контурі досить застосування типового П-регулятора. Параметри зовнішнього контуру нагрівача нестаціонарні і суттєво залежать від навантаження на котел, тому пропонується використовувати ПІД-регулятор, коефіцієнти якого розраховуються на основі методу локалізації.

Цікавим є наступний ряд робіт, де розглядаються оптимальні режими керування горінням в парових котлах [63; 64]. Для підтримки оптимальних режимів горіння палива пропонується використовувати ЕР, який здійснює пошук завдання РВП, при якому, виробляючи необхідну кількість тепла, котел буде споживати мінімальну кількість палива. Представлені результати випробування чисельної імітаційної динамічної нелінійної моделі парового котла із зв'язною АСР навантаження і економічності процесу горіння з

використанням ЕР. За результатами моделювання зроблено висновок про принципову можливість одночасного регулювання навантаження котла і оптимізації за допомогою ЕР режимів горіння при змінах теплоти згоряння палива, характеристик котла і режиму його роботи. Можливе автоматичне регулювання економічності роботи парових котлів при використанні ЕР без застосування штатних аналізаторів димових газів.

Розглянуто спосіб автоматичної оптимізації процесу горіння в топці енергетичного котла на основі прогнозного значення ККД котла, що дозволяє знизити інерційність АСР економічності процесу горіння [34]. Наведено тимчасові характеристики пошуку оптимального значення ККД.

Розглянута задача оптимізації режимів енергетичних котлів на основі суміші палив: природного газу та ВЕР з високою нестабільністю характеристик тиску і калорійності [65]. Запропоновано метод динамічного факторного аналізу процесів горіння в топці енергетичного котла, що дозволяє оцінювати поточну калорійність ВЕР. З метою зниження споживання первинних енергетичних ресурсів на основі використання ВЕР в котельних установках пропонується використовувати наступні контури автоматичного регулювання: по подачі вихідних паливних ресурсів, повітря, розрідженню в топці і вихідних режимних параметрах. Запропоновано систему ЕР подачі повітря і розрідження в топці за критерієм максимуму ККД котла. Застосування розробленої системи ЕР дозволяє знизити споживання природного газу за рахунок підвищення ефективності спалювання суміші палив. Наведені структури АСР можуть бути використані не тільки в котельних установках, а й в технологічних процесах більш широкого класу, де в основі теплотехнічних процесів лежить спалювання палива.

Розглянута побудова багатозв'язної системи оптимального регулювання економічності споживання палива для блоку парових котлів [66]. Пропонується мінімізувати споживання палива за рахунок стабілізації режимних параметрів і корекції подачі повітря за критерієм максимуму динамічного ККД котла.

При вирішенні завдань керування існує складність застосування класичної теорії автоматичного керування, так як практично всі технічні системи містять нелінійності, невизначеності. Класична теорія керування не може бути застосовна для побудови регулятора невивченого об'єкта, тому можна застосовувати системи адаптивного керування з самоорганізацією, саморегуляцією. Розглянуто технологічну схему барабанного парового котла і наведені його керовані параметри [67]. Розглядається рішення задачі дослідження систем автоматичної оптимізації з використанням методу статистичного імітаційного моделювання. Наведено структуру імітаційної моделі, яка містить наступні компоненти: модель об'єкта керування, генератор випадкових збурень, модуль прийняття рішень, а також процедуру збору статистики для оцінки якості керування. Представлено алгоритм функціонування імітаційної моделі системи, алгоритм вибору параметрів системи автоматичної оптимізації.

Проведено аналіз енергетичних втрат котла та виявлено основні параметри, що впливають на економічність його роботи [68]. Показано модель мінімізації енергетичних втрат котла з можливим впровадженням її в АСУ ТП теплових електростанцій.

Розроблено комплексну математичну модель динаміки барабанного парового котла з використанням системи автоматичного керування [69]. Модель доповнена основними контурами регулювання з типовими алгоритмами керування. Визначено основні взаємозв'язки між контурами регулювання і досліджено динаміку їх взаємодії. Наведено результати моделювання основних технологічних параметрів у вигляді перехідних процесів.

Розглянуто спосіб тривалого безперервного автоматичного визначення залишкового ресурсу елементів котла, який працює під тиском [70]. Використовувані алгоритми – складова частина загальної системи діагностики котла.

Розглядається актуальне питання оптимізації роботи теплоелектростанцій [71]. Завданням є управління станціями в такому режимі, щоб при найвищій генерації тепла можна було б отримувати найвищу економічну ефективність. Розглянуто основні цілі та фактори оптимізації.

Розглянуті особливості оптимізації параметрів системи управління паровим котлом методом повного перебору з використанням системи комп'ютерної математики Mathcad [72].

Наведені результати оптимізації генерації електричної енергії, при цьому забезпечують це засобами автоматизації АСУ ТП [73]. Розглянуто принципи впровадження автоматизованих систем керування паровими котлами на теплоелектростанціях.

Розглянута математичну модель парового котлоагрегату з турбінним наддувом, який використовується в якості корабельної силової установки, яка складена в системі рівнянь динаміки турбокомпресора, матеріального і теплового балансу газоповітряного тракту котла [74]. Модель призначена для налаштування системи керування котла з регуляторами подачі палива, витрати повітря і пари.

Розглянуті два підходи по дослідженню необхідного запасу стійкості систем регулювання інерційних об'єктів в умовах зміни режиму роботи технологічного обладнання [75; 76]. Запропоновано їх структурні рішення, наведені методики налаштувань. Виконано імітаційне моделювання перехідних процесів, проведені розрахунок і порівняння показників якості регулювання. Застосування такої методики дозволяє забезпечити достатній запас стійкості при збереженні високої якості функціонування систем регулювання.

Наведено результати аналізу поточної ситуації на ринку систем автоматичного керування котельними [77]. Наведено результати порівняння характеристик шаф автоматики для керування паровими котлами типу ДЕ на відповідність сучасним вимогам безпеки та ефективності. Показано

необхідність і ефективність використання систем диспетчеризації для територіально розподілених об'єктів.

Розглянуто експертну систему для керування топковим процесами парового котла, яка побудована за модульним принципом [78]. За кожним модулем закріплена відповідна цільова функція, виділена сукупність об'єктів контролю, обрані параметри, що діагностуються і розроблено належну базу знань. Розглянуто автоматизована система моніторингу показників енергетичної ефективності парових котлів, побудована на сучасній елементній і програмній базі [79].

Розглянуті технічні і програмні засоби інформаційно-керуючої системи, що забезпечує моніторинг технологічних параметрів, керування газовими пальниками та автоматичне регулювання технологічного процесу енергетичного котла БКЗ-420-140 НГМ [80]. Наведено алгоритми цифрових регуляторів, виконаних на базі інтелектуальних мікроконтролерів.

Описано метод синтезу алгоритму прогнозування модельного керування, для регулювання активної потужності енергоблоку теплової електростанції [81]. Це дозволяє підвищити якість регулювання в порівнянні з класичним лінійним керуванням

Запропоновано використання апарату нейронних мереж з нечіткою логікою при визначенні оптимальних значень параметрів ПІ-регуляторів в системах адаптивного керування теплоенергетичних об'єктів [82]. Показано ефективність запропонованої інтелектуальної адаптивної системи в порівнянні з традиційною адаптивною АСР.

Порівнюється якість функціонування цифрових регуляторів двох типів [83]. Перший – побудований на базі функціональних блоків і реалізує пропорційно-диференційний в квадраті закон регулювання, другий – використовує пропорційно-інтегрально-диференціальний закон в цифровій формі. Параметром регулювання є рівень в барабані парового котла. Виконавчий механізм – клапан, керований реверсивним електродвигуном.

Запропоновано програмну реалізацію нечіткого регулятора в системі керування парового котла ТЕС для адаптації ПІД-регулятора на основі чітких терм-множин [84]. Практична значимість дослідження полягає в розробці step-time алгоритму фазифікації безперервних фізичних величин технологічного процесу котла і структурної схеми керування парового котла, як надбудови над класичними ПІД-регуляторами зі змінними коефіцієнтами. Структурна схема регулювання процесу горіння і пароутворення побудована на основі системи правил двозначної логіки.

Розглядається підвищення якості регулювання температури перегрітої пари, якої можна досягти при визначенні параметрів динамічного налаштування АСР за рахунок зменшення похибки при апроксимації експериментальних перехідних характеристик випереджаючої і інерційної ділянки об'єкта регулювання при переході до розімкнуто-замкнутої системи регулювання [85].

Чисельно досліджено вплив відносної сталої часу об'єкта, що змінюється в широких границях, на якість регулювання температури перегрітої пари за котлом з урахуванням величини регулюючого впливу в системі з ПІ і ПІД-регулятором [86]. В основу моделювання покладено АСР з одним контуром. Чим менше величина відносної сталої часу об'єкта, тим більше при відпрацюванні зовнішнього збурення АСР з ПІД-регулятором інтегральна помилка регулювання. Зменшення чисельного значення відносної постійної часу об'єкта при відпрацюванні зовнішнього збурення призводить до зменшення відносного часу появи максимальної динамічної помилки регулювання від загального відносного часу регулювання.

Розглянуто каскадну систему з ПІ-регулятором у зовнішньому контурі, з введенням функціональної складової сигналу неузгодженості зовнішнього контуру і від'ємним зворотним зв'язком по сигналу неузгодженості між завданням по витраті пари і сигналом витрати пари на виході котла у внутрішньому контурі [87].

Пропонується використання H_∞ -методу формування контуру з обмеженням на розміщення полюсів передавальної функції замкненої системи в заданій області із залученням апарату нерівності лінійних матричних перетворень [88]. Вирішується завдання синтезу стійкого регулятора для управління котельною установкою. Вимоги до замкненої системи сформульовано як у вигляді частотних обмежень на сингулярні числа передавальної функції розімкненої системи, так і в формі обмежень на розміщення полюсів передавальної функції замкненої системи в заданій області на комплексній площині. Проведено редукцію H_∞ -регулятора повного порядку.

Розглянуто методи налаштування ПД-регулятора в каскадній системі автоматичного регулювання рівня води в барабані котла, на базі якої запропоновано інваріантну каскадну систему автоматичного регулювання [89]. У такій системі не вимірюється зовнішнє збурення, наприклад, витрату пари, а паралельно реальній інерційній ділянці об'єкта регулювання реалізується модель цієї ділянки. Різниця поточного значення рівня води в барабані і виходу моделі інерційної ділянки об'єкта регулювання подається на вхід пристрою компенсації еквівалентного зовнішнього збурення. Це дозволяє використовувати пристрій компенсації в замкнутому контурі, отже, якість регулювання поліпшується при впливі будь-яких зовнішніх збурень.

Розглянуто каскадну систему з П-регулятором у зовнішньому контурі, з введенням функціональної складової сигналу неузгодженості зовнішнього контуру і від'ємним зворотним зв'язком по сигналу неузгодженості між завданням по витраті пари і сигналом витрати пари на виході котла у внутрішньому контурі [90].

Присвячена робота питанням побудови адаптивних і стійких систем керування різними технічними системами, які функціонують в умовах невизначеності [91]. Розглядаються питання аналізу, проектування, дослідження і практичного застосування систем керування, отриманих в рамках критерію надлишкової стійкості.

Розглядаються питання керування складними технічними системами в області енергетики [92]. Увага приділяється нечітким системам керування двигуном парового котла.

Методами синергетичної теорії керування синтезовано систему стабілізації рівня води в барабані котла і тиску перегрітої пари на виході пароперегрівача котла, що забезпечує стійку роботу котла в умовах значної зміни навантажень [93].

Отримано закони керування барабанними паровими котлами на підставі їх нелінійної математичної моделі, що адекватно описує процеси, які протікають в них в широкому діапазоні режимів роботи [94]. Отримані закони керування є законами верхнього рівня. Розраховані на їх основі завдання по витраті води і тепловому потоку передаються потім підсистемам керування живлення котла і горіння в якості завдань.

Наведено загальний принцип енергозберігаючого керування паровими котлами теплових електростанцій [95]. У функціональні залежності і вихідні моделі керування котельною установкою включено параметри активатора горіння, який поліпшує процес спалювання низькосортних палив. Показано спосіб підвищення точності вимірювання та регулювання подачі твердого палива в топку котла теплових електростанцій. Розроблено систему автоматичного регулювання подачі активаторів горіння, яка заснована на визначенні якості і кількості палива, яке подається.

Показано, що паровий котел є складним об'єктом, кожен контур якого має хоча б одну ланку, спільну з іншим контуром регулювання [96]. Схеми, що застосовуються для регулювання рівня води в барабані і тиску пари, мають структури автоматичних керуючих пристроїв, коли на вхід регулятора подається зважена сума сигналів, що визначають поточний рівень в барабані, витрати живильної води і витрати перегрітої пари. Така порівняно складна система керуючого пристрою з одним регулятором не завжди забезпечує належну незалежність регульованих параметрів. Перспективним є застосування систем керування параметрами, синтезованими на базі

принципів автономності та інваріантності. Запропоновано методику синтезу коригування зв'язку регуляторів двічі зв'язаної системи, яка може бути використана при дослідженні систем на стійкість, керованість, спостережливість і якість перехідних процесів.

Викладаються результати роботи по автоматизації керування процесом горіння палива в котельній установці, пропонуються шляхи підвищення ефективності процесу горіння на основі екстремального керування [97].

Розглянуто задачу синтезу законів регулювання системою керування парового котла [98]. Розроблено нелінійну модель парового котла в системі Simulink. В системі Matlab проведена лінеаризація розробленої нелінійної моделі та проведено синтез законів регулювання системою керування парового котла.

Наведено результати досліджень в області математичного моделювання теплових процесів котельного агрегату [24]. Представлено математичну модель керування температурою перегрітої пари котельного агрегату. Встановлено, що система керування адекватно реагує на збурення і відновлює задану температуру перегрітої пари, змінюючи при цьому необхідні параметри системи.

Метою досліджень була розробка системи керування, що забезпечує підвищення точності регулювання витратою газу і необхідних показників температури перегрітої пари в умовах функціонування котельного агрегату шляхом розробки системи автоматичного регулювання витрат газу в топці котельного агрегату [99].

Розглядаються технологічні схеми функціонування парових котлів [100]. На їх основі виконується змістовний опис процесів функціонування та ставляться завдання керування технологічним процесом в барабанному і прямоточному парових котлах.

Наводиться опис розробленої на сучасних технічних і програмних засобах системи керування котлом пароповітряної станції [101]. Вказуються особливості парового котла як об'єкта автоматизації. Представлено рішення

по багатовимірному регулюванню теплового навантаження котла та використання в якості автоматичних регуляторів, що відновлюють та прогнозують АСР.

Для керування паровим котлом з високими показниками якості та ефективності необхідно правильно налаштувати автоматизовану систему [102]. Проведено розрахунок комбінованої системи автоматичного регулювання тиску пари в барабані парового котла БКЗ 75-39. Імітаційне моделювання показало, що об'єкт стає більш стійким вплив, що збурює, повністю компенсується при включеному компенсаторі.

Запропоновано метод попереджувального керування складними технологічними комплексами за критеріями енергетичної ефективності на основі моделей зворотної динаміки [103]. Запропоновано підхід до побудови зворотних моделей динаміки технологічних об'єктів керування в умовах завод з використанням методу експоненціальної фільтрації. Наведено приклад побудови адаптивної системи регулювання подачі повітря в паровий котел за критерієм максимуму ККД процесів горіння.

Розглядаються завдання керування технологічним процесом в барабанному і прямоточному парових котлах [104]. Пропонується завдання теоретичної моделі у вигляді функцій переходів і функції виходів для моделювання технологічних процесів. Пропонується модель керування водно-хімічним режимом при нечіткому завданні параметрів.

Розглянуті роботи показали, що типовим підходом до вирішення даного завдання є використання газо-аналітичних приладів в якості первинних вимірювальних датчиків в контурах регулювання подачі повітря і палива та використання адаптивних систем керування за показниками ефективності.

Для розглянутого класу систем керування застосування газо-аналітичних приладів ускладнюється тим, що вторинні енергетичні ресурси містять у своєму складі агресивні компоненти, які призводять до прискореного зносу первинних приладів і виходу їх з ладу. Адаптивні системи керування ґрунтуються на використанні в якості цільової функції керування непрямих

показників ефективності топкових процесів. Це пов'язано з тим, що вимір поточного ККД топкових процесів в умовах високого рівня перешкод являє собою некоректно поставлене завдання ідентифікації. При цьому наявність випадкових збурень призводить до більших помилок оцінювання і, як наслідок, до зниження точності і швидкодії контуру адаптивного керування [105].

1.4 Постановка завдання дисертаційного дослідження

Для сучасної української держави, з урахуванням особливостей її географічного положення та наявності певного виду енергоресурсів, перспективним напрямком розвитку енергетичної галузі може стати реалізація мало витратних заходів, які швидко окуповуються, та дозволять без залучення значних коштів, в найкоротші терміни зменшити споживання палива і електроенергії. До таких заходів можна віднести використання на існуючих парових котлах, що працюють на органічному паливі, нових структурних схем систем автоматичного управління, які дозволять без істотної модернізації устаткування використовувати в якості палива горючі кисневмісні вуглеводневі гази.

Проаналізовано способи отримання кисневмісних вуглеводневих газів змінного складу и особливості їх спалювання та керування в парових котлах.

По-перше, вивчено результати чисельного дослідження і моделювання характеристики запалювання вуглеводневих паливних сумішей при проходженні термічного крекінгу для реактивного палива в повітряно-реактивній установці при високих числах Маха. В основу методу дослідження покладено модель молекулярного перенесення і хімічної кінетики, особливу увагу приділено змінам складу палива, температури і домішок. Показано

вплив на температуру горіння і займання суміші домішок невеликої кількості CH_4 і C_2H_4 в реактивне паливо [106].

Для несертифікованих видів палива підхід, викладений в [106] не може бути прийнятним тому, що зміна хімічного складу палива відбувається випадковим чином в будь-який момент часу.

Управління спалюванням пального невідомої теплотворної здатності може бути забезпечено екстремальним регулятором. При заданій витраті пального шляхом зміни витрати повітря забезпечується стехіометричне співвідношення, яке відповідає максимальній температурі продуктів згорання.

Максимальна температура досягається при коефіцієнті надлишку повітря α , який дорівнює 1,0.

Доцільно розглянути підходи до моделювання та результати натурних і чисельних експериментів в ряді досліджень, які були отримані при вивченні утворення сажі, фактично вуглецю. Розглядаються види палива, які мають властивості утворення сажі, що містять циклічні ароматичні вуглеводні (нафталін) [107]. Надмірна концентрація кисню на ефект утворення сажі не вплинула. Вплив зробила зміна температури полум'я, витрати палива і тривалості його горіння.

Вивчено етапи горіння метану в повітрі для відношення повітря/паливо від 0,5 до 1,4 і тиску від 1 до 70 бар[108]. В основу аналізу покладено скорочений до чотирьох етапів кінетичний механізм. Тривалість етапів пов'язана зі швидкостями елементарних реакцій, що входять в ланцюговий механізм для окиснення метану. Отримано аналітичні вирази для швидкості горіння і для характерної температури. Для збідненого палива чисельні і натурні експерименти збіглися. Результати за швидкостями горіння вийшли завищеними для стехіометричного і багатого полум'я.

Модель займання первинних еталонних палив (32 види) розроблена виходячи зі спрощеної кінетичної моделі, яка включала 55 реакцій[109]. Результати досліджень підтвердили відомі двоступеневі характеристики займання важких вуглеводнів, які включають низькі і високі температурні

цикли з подальшим розгалуженим ланцюгом вибуху. Попередній аналіз побудови кінетичної моделі показав, що для створення моделі окиснення суміші газів необхідно використовувати підхід, заснований на модельному уявленні умовної формули палива [108; 109].

По-перше, одним із завдань дисертаційного дослідження є розробка математичної моделі визначення складу суміші вуглеводневих кисневмісних газів в модельному уявленні її умовною формулою з вихідними даними у вигляді вимірюваних технологічних параметрів.

По-друге, в рішенні завдання спалювання палива зі змінним хімічним складом можна виділити кілька основних напрямків: конструкційний, технологічний і аналітичний. Провідними світовими розробниками технологій спалювання синтез-газів є Siemens, General Electric і Mitsubishi Heavy Industries, які пропонують спалювати штучні гази в газотурбінних установках (ГТУ) з удосконаленими камерами згоряння [110]. Розглядається можливість модернізації самих пальників з метою зміни геометрії факела, де в конструкції пальника використовується ефект взаємодії газових струменів з поперечним потоком повітря, що набігає [111].

Інший підхід пов'язаний з модифікацією самого палива – розведенням синтез-газу азотом, паром або продуктами згоряння [112], яке виконується для підвищення потужності ГТУ, за рахунок збільшення масової витрати продуктів згоряння через газову турбіну або підвищення потужності паротурбінної частини, завдяки підвищенню масової витрати димових газів через котел-утилізатор. Можливе додавання в низькосортне паливо активаторів горіння (анакларидів) з одночасним поліпшенням системи подачі палива в топку [29].

Економічний ефект може бути досягнуто за рахунок розробки індивідуальної технологічної схеми підготовки і подачі штучного газу до місця спалювання, в тому числі і схеми проміжного відбору теплоти на виробництво електроенергії не з кінцевого агрегату спалювання штучного газу, а з проміжної точки його часткового охолодження [113]. У разі наявності

кількох споживачів газоподібного палива можна розподілити теплове навантаження між групою котлів, які працюють на загальний паропровід. В основі такого рішення лежить мінімізація цільової функції, яка враховує ймовірність відмови обладнання і максимальну ефективність його використання [114].

Аналітичний підхід пов'язаний з визначення хімічного складу горючого газу за допомогою математичної моделі процесу спалювання палива з відомим якісним складом [115]. Подальше вдосконалення математичного методу визначення складу горючого газу дозволяє пом'якшити обмеження по використовуваному паливу і реалізувати цю ідею за рахунок використання компресора [116], що дозволить збільшити діапазон управління по теплотехнічному параметру.

Такий підхід дозволить удосконалити існуючі системи нелінійного управління котлоагрегатом, в яких екстремальний регулятор аналізує поточні витрати палива, повітря і пари, і визначає оптимальне співвідношення компонентів газоповітряної суміші [97].

В Україні на теплових електростанціях, оснащених барабанними котлами, промислових і теплофікаційних котельнях для підтримки заданої продуктивності пари використовується типова АСУ теплового навантаження. Завдання АСУ теплового навантаження полягає в підтримці заданого тиску перегрітої пари, коли барабанний котел працює в регулюючому режимі або заданій витраті перегрітої пари, коли котел працює в базовому режимі. Така АСУ, як правило, реалізується в двох модифікаціях – з сигналом по витраті палива, коли на пальники подається рідке або газоподібне паливо з постійною теплотворною здатністю, і з сигналом по тепловиділенню в котельній камері, чи коли використовується тверде паливо, або якісний склад рідкого або газоподібного палива не є постійним [40]. Тому наступним завданням дисертаційного дослідження є – вдосконалення математичної моделі барабанного котла, яка враховує особливості роботи на загальний паропровід та залежну від теплотворної здатності й густини горючих кисневмісних

вуглеводневих газів та обмежень по пропускній здатності регулюючого органу.

По-третє, проведений аналіз показує, що для підтримки заданого навантаження при зниженні калорійності палива простого збільшення витрати палива може виявитися недостатньо. Виникають обмеження, пов'язані з пропускною здатністю регулюючих клапанів і пальників. Навіть застосування компресора буде обмежуватися швидкістю витікання газу через пальник. Зміна складу палива призводить до значних відхилень температур і швидкостей димових газів по довжині газового тракту. Виходом з даної ситуації може служити зміна площі поверхні нагрівання. Це можна виконати, включаючи в роботу або виключаючи з роботи котельне обладнання, тобто керувати структурою обладнання.

Природно, що при змінній роботі обладнання збільшується його знос. Тому при прийнятті рішення по управляючим впливам слід враховувати ступінь зносу котельного обладнання.

В-четверте, виникає задача синтезу АСУ тепловим навантаженням групи барабанних котлів, що працюють на загальний паропровід, яка дозволяє компенсувати внутрішні збурення по складу і якості палива і зовнішні збурення зі зміни теплового навантаження за рахунок вибору режиму роботи кожного з котлів, що враховує їх знос. Тому, ще одним завданням дисертаційного дослідження є синтез АСУ тепловим навантаженням групи барабанних котлів, що працюють на загальний паропровід, яка дозволяє компенсувати внутрішні збурення по складу і якості палива й зовнішні збурення зі зміни теплового навантаження за рахунок вибору режиму роботи кожного з котлів, що враховує їх знос.

Виходячи з викладених завдань метою роботи є модернізація АСУ паровим котлом за рахунок ідентифікації змінного складу кисневмісного вуглеводневого палива при експлуатації на будь-яких рівнях потужності.

1.5 Висновки до першого розділу

1. Проведено аналіз можливостей отримання несертифікованих кисневмісних вуглеводневих газів. Особливості експлуатації сучасних АСУ ТП для спалювання несертифікованих газів визначають завдання забезпечення якості регулювання. Гострота і важливість такого завдання визначається тим, що в даний час на науковому рівні воно розроблено недостатньо, а на інженерному – вирішується інтуїтивно. При цьому практично відсутній науково-методичний апарат синтезу АСУ, який забезпечує ефективність експлуатації парових котлів при керуванні за станом структури об'єкту чи технологічного параметра.

2. Показано перспективність використання несертифікованих кисневмісних вуглеводневих газів у разі модернізації АСУ ТП, яка дозволить використовувати гази вторинного застосування не тільки з промислових підприємств, а й гази біотехнологічного походження. Аналіз перспектив розвитку сучасних АСУ ТП для технологій спалювання несертифікованих газів, перш за все в технологіях, де суттєво змінюється густина, і питома теплотворна здатність, показує, що істотно повинен бути змінений регулюючий орган подачі несертифікованого газу. Регулюючий орган повинен мати суперечливу фізичну властивість в ряді випадків, а саме – збільшувати витрати більше ніж граничні.

3. Обґрунтовано структуру і сформульовано завдання дисертаційного дослідження, яке полягає у розробці моделі і методу визначення складу продуктів згорання кисневмісних вуглеводневих газів.

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛЬ І МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ СКЛАДУ ПРОДУКТІВ ЗГОРАННЯ КИСНЕВМІСНИХ ВУГЛЕВОДНЕВИХ ГАЗІВ

Розроблено математичну модель для визначення складу суміші вуглеводневих кисневмісних газів в модельному представленні її умовною формулою з вихідними даними у вигляді вимірюваних технологічних параметрів: температури продуктів згорання та об'ємних витрат горючої суміші і повітря.

Здійснена перевірка працездатності шляхом вирішення задачі для трьох типів кисневмісних горючих: що включає до свого складу хімічно зв'язаний кисень; що включає до свого складу кисень у вигляді індивідуальної активної речовини; що включає до свого складу хімічно зв'язаний кисень, який входить до складу негорючої частини суміші. Запропоновано метод визначення умовної формули і ентальпії палива змінного складу в процесі його спалювання.

2.1 Математична модель визначення складу продуктів згорання

В [31] узагальнено описаний метод розрахунку складу продуктів згорання при відомому складі палива (в загальному випадку сумішевого). В [32] метод деталізований стосовно вуглеводнів. Перелік речовин, що представляють такий вид палива широкий, але, все ж, обмежений. Врахування в їх складі додатково ще лише одного елемента – кисню – істотно розширює кількість речовин, змінює процес горіння і склад продуктів згорання, що розраховується. До них можуть бути віднесені спирти, ефіри, кетони

(представник – ацетон) та інші. Всі ці речовини включають в свій склад хімічно зв'язаний кисень. Крім цього існують горючі суміші газів, до складу яких кисень може входити у вигляді активного хімічного елемента. Така ситуація виникає, наприклад при отриманні газу в процесі дегазації вугільних шахт. У першому наближенні можна вважати газ, що видаляється з шахт, як суміш метану і повітря. Ще до одного виду горючих можна віднести суміш газів, в яких кисень не входить до складу горючих елементів, але є в хімічно зв'язаному вигляді в інертних складових. В якості їх представників можна розглядати гази, які утворюються в процесі бродіння в метантенках. У їх складі можна виділити метан, як горючу складову без кисню, а також вуглекислий газ і пари води з киснем у зв'язаному вигляді [6; 8; 13].

Незважаючи на таке різноманіття горючих речовин, процес утворення продуктів згоряння і визначення їх температури може бути описаний за допомогою єдиної моделі. Визначимо модель процесу горіння на прикладі етилового спирту, що включає до свого складу атоми $[C]$, $[H]$, $[O]$. Він є представником кисневмісних вуглеводнів, що охоплюють широкий клас органічних палив. Так, додаткове врахування всього лише двох елементів $[S]$ і $[N]$, що зустрічаються в паливі в менших кількостях, дозволяє змоделювати майже всі органічні сполуки, що горять в повітряній атмосфері [38; 106–109; 118–120]. Визначимо умовні формули пального і окиснювача. З урахуванням хімічної структури етилового спирту його формула має вигляд $C_2H_5(OH)$. Виходячи з умов побудови моделі, немає необхідності враховувати структуру даної речовини. В цьому випадку умовна формула пального має вигляд

$$C_{b_c} H_{b_H} O_{b_o}. \quad (2.1)$$

Тут b_c , b_H , b_o – кількість відповідних атомів в умовній формулі пального. Для етилового спирту

$$b_c=2, \quad b_H=6, \quad b_o=1. \quad (2.2)$$

В якості окиснювача розглянемо повітря. Його склад в об'ємних частках відповідає приблизно 21 % – O_2 кисню, 78 % – N_2 азоту і 1 % припадає на різні

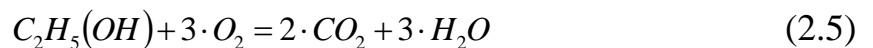
домішки у вигляді аргону, вуглекислого газу та інших, в загальному інертних, домішок. Всі домішки не беруть участі в процесі горіння так само, як і азот. В силу цього для спрощення розрахунків всі домішки представимо у вигляді ще 1 % – N_2 . В кінцевому підсумку повітря в розрахунках видається виходячи зі складу: 21 % – O_2 кисень, 79 % – N_2 . Умовна формула будується виходячи з кількості атомів, що входять, наприклад, в структурну формулу. Розглянемо не об'ємні, а масові частки. Атомні маси (2.3):

$$\mu_O = 15.9994; \mu_N = 14.0070. \quad (2.3)$$

В цьому випадку з урахуванням прийнятого відсоткового складу формула повітря буде мати вигляд (2.4)

$$O_{0.419}N_{1.518}. \quad (2.4)$$

Реакція горіння спирту в кисні при їх стехіометричному співвідношенні (2.5)



З (2.5) випливає, що для стехіометричного спалювання одного моля спирту необхідно три моля кисню. Іншими словами, для пари спирт – кисень мольний стехіометричний коефіцієнт має значення

$$\chi_0^O = 3. \quad (2.6)$$

З урахуванням прийнятого складу окиснювача у вигляді повітря (2.4) мольний стехіометричний коефіцієнт реакції дорівнює

$$\chi_0^W = 14.32. \quad (2.7)$$

Реакції горіння в енергетичному обладнанні йдуть не обов'язково в стехіометричному співвідношенні. Це враховується введенням коефіцієнта надлишку окиснювача α , і всі співвідношення реакцій будуються з використанням мольного коефіцієнта співвідношення компонентів

$$\chi^W = \alpha \cdot \chi_0^W. \quad (2.8)$$

Коефіцієнт надлишку окиснювача показує перевищення мольного коефіцієнта співвідношення компонентів над мольним стехіометричним.

Розрахунок складу продуктів згоряння здійснюється на основі умовної формули палива, що включає пальне і окиснювач з урахуванням величини χ^w . Так, для етилового спирту з урахуванням (2.1), (2.2), (2.4), (2.7) і (2.8) ця формула буде мати вигляд

$$C_2H_6O_{(1+\alpha \cdot \chi_0^w \cdot 0.419)}N_{(\alpha \cdot \chi_0^w \cdot 1.518)}. \quad (2.9)$$

У загальному вигляді для довільного вуглеводневого кисневмісного пального, що спалюється в повітрі, умовна формула палива буде мати вигляд

$$C_{b_c}H_{b_H}O_{(b_o+\alpha \cdot \chi_0^w \cdot 0.419)}N_{(\alpha \cdot \chi_0^w \cdot 1.518)}. \quad (2.10)$$

Перелік речовин та іонів, які можуть утворитися в процесі горіння такого палива:

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

Визначення складу продуктів згоряння полягає в знаходженні кількісного співвідношення газів з цього переліку. Кількість невідомих в моделі визначається переліком речовин в (2.11).

При варіюванні коефіцієнта надлишку окиснювача α буде змінюватися кількість і склад речовин, які утворюються. Наприклад, при $\alpha < 1$, тобто при недостатці окиснювача, в суміші може бути відсутнім $[O_2]$ і бути присутнім $[CO]$ і $[H_2]$. У протилежність цьому, при $\alpha > 1$ з'являються $[O_2]$ і $[NO]$, але зникають $[CO]$ і $[H_2]$. До складу продуктів згоряння можуть входити і інші більш складні речовини, але при будь-якій величині α їх кількість буде значно малою. Тому, в розрахунках вони не беруться до уваги. Таким чином, в (2.11) наведено перелік речовин, що охоплює практично важливі випадки.

Розглянемо рівняння хімічної рівноваги для речовин зі списку (2.11). Їх перелік наведено в (табл. 2.1.).

Таблиця 2.1 – Основні рівняння хімічної рівноваги залежних речовин

1	$CO \leftrightarrow C + O$
2	$CO_2 \leftrightarrow C + 2O$
3	$H_2O \leftrightarrow 2H + O$
4	$OH \leftrightarrow H + O$
5	$H_2 \leftrightarrow 2H$
6	$O_2 \leftrightarrow 2O$
7	$N_2 \leftrightarrow 2N$
8	$NO \leftrightarrow N + O$

Для рівнянь, що наведені в таблиці, можна записати закон діючих мас, який являє собою відношення концентрації речовин відповідних реакцій, що є константою хімічної рівноваги. Так, наприклад, для другого рівняння (табл. 2.1.) вираз закону матиме вигляд

$$\frac{c(C) \cdot c^2(O)}{c(CO_2)} = K_{CO_2}(T). \quad (2.12)$$

Тут $c(C)$, $c(O)$, $c(CO_2)$ – мольні концентрації відповідного вуглецю, кисню і вуглекислого газу, $K_{CO_2}(T)$ – константа хімічної рівноваги утворення вуглекислого газу при деякій температурі T . Показник степеню визначається коефіцієнтом при відповідному хімічному елементі. Рівняння виду (2.12), записані для речовин з (табл.2.1) є частиною запропанованої моделі [6; 8; 13].

Зручніше склад суміші газів визначати не через концентрації, а через їх парціальні тиски. Рівняння виду (2.12) можна виразити і через ці величини. Мольні концентрації продуктів згоряння визначаються по відношенню, наприклад, до одного молю палива на підставі виразу (2.10). Для заміни концентрацій на парціальні тиски додатково до них введемо ще одну змінну M_T – кількість розглянутих молей палива. Її величину будемо не обирати, а визначати в процесі розрахунків таким чином, щоб чисельне значення величини парціальних тисків продуктів згоряння були рівні їх концентраціям.

Таким чином, всього модель включає 13 невідомих величин: 12 парціальних тисків газів (2.11) в продуктах згоряння і число молей M_T кількості палива, що розглядається.

Перші вісім рівнянь моделі будуть представлені парціальними тисками продуктів згоряння через закон діючих мас для реакцій з (табл. 2.1):

$$\frac{P_C \cdot P_O}{P_{CO}} = K_{CO}(T); \quad (2.13)$$

$$\frac{P_C \cdot P_O^2}{P_{CO_2}} = K_{CO_2}(T); \quad (2.14)$$

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

$$\frac{P_H \cdot P_O}{P_{OH}} = K_{OH}(T); \quad (2.16)$$

$$\frac{P_H^2 \cdot P_O}{P_{H_2}} = K_{H_2}(T); \quad (2.17)$$

$$\frac{P_O^2 \cdot P_O}{P_{O_2}} = K_{O_2}(T); \quad (2.18)$$

$$\frac{P_N^2 \cdot P_O}{P_{N_2}} = K_{N_2}(T); \quad (2.19)$$

$$\frac{P_N \cdot P_O}{P_{NO}} = K_{NO}(T). \quad (2.20)$$

Константи хімічної рівноваги представлені в табличному виді у відповідних довідниках і в розрахунках для відповідної температури можуть бути обрані або розраховані за допомогою апроксимаційних поліномів. Крім того, вони можуть бути розраховані на основі ентальпій утворення і ентропій речовин, що входять в реакції, які розглядаються, і які, в свою чергу, також представлені в табличному виді, або можуть бути розраховані на основі апроксимаційних поліномів [31].

Наступні 4 рівняння складемо на основі закону збереження речовини у вигляді рівності кількості атомів відповідного хімічного елемента в паливі та продуктах згоряння. В даному випадку чисельне значення парціальних тисків

газів в продуктах згоряння рівні їх концентраціям. Кількість атомів в паливі розрахуємо на підставі виразу (2.10) з урахуванням кількості розглянутих його молекул M_T

$$\text{для } [C] \quad b_C \cdot M_T = P_{CO} + P_{CO_2} + P_C; \quad (2.21)$$

$$\text{для } [H] \quad b_H \cdot M_T = 2 \cdot P_{H_2O} + P_{OH} + 2 \cdot P_{H_2} + P_H; \quad (2.22)$$

$$\text{для } [O] \quad (b_O + \alpha \cdot \chi_0^w \cdot 0.419) \cdot M_T = P_{CO} + 2 \cdot P_{CO_2} + P_{H_2O} + P_{OH} + 2 \cdot P_{O_2} + P_{NO} + P_O; \quad (2.23)$$

$$\text{для } [N] \quad (\alpha \cdot \chi_0^w \cdot 1.581) \cdot M_T = 2 \cdot P_{N_2} + P_{NO} + P_N. \quad (2.24)$$

Для замикання системи в основу останнього рівняння приймемо закон Дальтона, що виражає рівність суми парціальних тисків продуктів згоряння тиску в топці парового котла P_Σ :

$$P_\Sigma = P_{CO} + P_{CO_2} + P_{H_2O} + P_{OH} + P_{H_2} + P_{O_2} + P_{N_2} + P_{NO} + P_C + P_H + P_O + P_N. \quad (2.25)$$

2.2 Метод рішення модельної задачі

Записана модель є системою нелінійних алгебраїчних рівнянь. Для її вирішення може бути використаний метод Ньютона, який полягає в лінеаризації рівнянь системи і рішення їх щодо поправок невідомих величин. Особливістю системи, отриманої в процесі лінеаризації, є її погана обумовленість. Це викликано дуже малою величиною деяких членів (парціальних тисків) і великою різницею в величинах між ними, яка може досягати 10...15 порядків. Це веде до нестійкості і великої похибки рішення.

Для підвищення точності вихідну систему рівнянь (2.13 2.25) піддаємо логарифмуванню. Це призведе до того, що члени модифікованої таким чином системи залишаться нелінійними, але будуть відрізнятися між собою не більше ніж в 10...15 разів. Але такий підхід не вирішує повністю проблему великої різниці між членами рівнянь системи, яку піддано лінеаризації. При

лінеаризації, що проводиться звичайним чином, з використанням в якості аргументів шуканих величин (парціальних тисків продуктів згорання), для яких будуть визначатися поправки. Отже, вони можуть різнитися між собою на ті ж 10...15 порядків. Для уникнути цього, в якості аргументів, при диференціюванні було використано логарифми шуканих аргументів (парціальних тисків і величини M_T) [6; 8; 13]. Для приклада розглянемо рівняння (2.14). Після логарифмування маємо

$$\ln(P_C) + 2 \cdot \ln(P_O) - \ln(P_{CO_2}) = \ln(K_{CO_2}(T)), \quad (2.26)$$

Після лінеаризації

$$1 \cdot \Delta[\ln(P_C)] + 2 \cdot \Delta[\ln(P_O)] - 1 \cdot \Delta[\ln(P_{CO_2})] = (-1) \cdot \{\ln(P_C) + 2 \cdot \ln(P_O) - \ln(P_{CO_2}) - \ln[K_{CO_2}(T)]\}^0 \quad (2.27)$$

Тут верхній індекс ⁰ говорить про те, що вираз в фігурних дужках є початковим наближенням або береться з попереднього кроку розрахунку.

Щоб трохи знизити громіздкість записів, в подальшому, вираз виду $\Delta[\ln(P_O)]$ буде представлено, як Δ_O , а, наприклад, $\Delta[\ln(P_{CO_2})]$, – як Δ_{CO_2} .

Велику складність представляє обробка таким чином рівнянь виду (2.21–2.25). В якості прикладу візьмемо рівняння (2.21). Після його логарифмування отримаємо

$$\ln(b_C) + \ln(M_T) = \ln(P_{CO} + P_{CO_2} + P_C), \quad (2.28)$$

а після лінеаризації

$$\frac{P_{CO}}{A} \cdot \Delta_{CO} + \frac{P_{CO_2}}{A} \cdot \Delta_{CO_2} + \frac{P_C}{A} \cdot \Delta_C - \Delta_{M_T} = (-1) \cdot [\ln(A) - \ln(M_T) - \ln(b_C)]^0, \quad (2.29)$$

де $A = P_{CO} + P_{CO_2} + P_C$.

Перетворивши описаним способом вихідну систему (2.13–2.25), отримаємо систему рівнянь, над якою проведено лінеаризацію

$$1 \cdot \Delta_C + 1 \cdot \Delta_O - 1 \cdot \Delta_{CO} = (-1) \cdot \{\ln(P_C) + \ln(P_O) - \ln(P_{CO}) - \ln[K_{CO}(T)]\}^0; \quad (2.30)$$

$$1 \cdot \Delta_C + 2 \cdot \Delta_O - 1 \cdot \Delta_{CO_2} = (-1) \cdot \{\ln(P_C) + 2 \cdot \ln(P_O) - \ln(P_{CO_2}) - \ln[K_{CO_2}(T)]\}^0; \quad (2.31)$$

$$2 \cdot \Delta_H + 1 \cdot \Delta_O - 1 \cdot \Delta_{H_2O} = (-1) \cdot \{2 \cdot \ln(P_H) + \ln(P_O) - \ln(P_{H_2O}) - \ln[K_{H_2O}(T)]\}^0; \quad (2.32)$$

$$1 \cdot \Delta_H + 1 \cdot \Delta_O - 1 \cdot \Delta_{OH} = (-1) \cdot \{\ln(P_H) + \ln(P_O) - \ln(P_{OH}) - \ln[K_{OH}(T)]\}^0; \quad (2.33)$$

$$2 \cdot \Delta_H - 1 \cdot \Delta_{H_2} = (-1) \cdot \left\{ 2 \cdot \ln(P_H) - \ln(P_{H_2}) - \ln[K_{H_2}(T)] \right\}^0; \quad (2.34)$$

$$2 \cdot \Delta_o - 1 \cdot \Delta_{O_2} = (-1) \cdot \left\{ 2 \cdot \ln(P_o) - \ln(P_{O_2}) - \ln[K_{O_2}(T)] \right\}^0; \quad (2.35)$$

$$2 \cdot \Delta_N - 1 \cdot \Delta_{N_2} = (-1) \cdot \left\{ 2 \cdot \ln(P_N) - \ln(P_{N_2}) - \ln[K_{N_2}(T)] \right\}^0; \quad (2.36)$$

$$1 \cdot \Delta_N + 1 \cdot \Delta_o - 1 \cdot \Delta_{NO} = (-1) \cdot \left\{ \ln(P_N) + \ln(P_o) - \ln(P_{NO}) - \ln[K_{NO}(T)] \right\}^0; \quad (2.37)$$

$$\text{для } [C] \quad \frac{P_{CO}}{A} \cdot \Delta_{CO} + \frac{P_{CO_2}}{A} \cdot \Delta_{CO_2} + \frac{P_C}{A} \cdot \Delta_C - 1 \cdot \Delta_{M_T} = (-1) \cdot [\ln(A) - \ln(M_T) - \ln(b_C)]^0, \quad (2.38)$$

$$\text{де } A = P_{CO} + P_{CO_2} + P_C;$$

для [H]

$$\frac{2 \cdot P_{H_2O}}{L} \cdot \Delta_{H_2O} + \frac{P_{OH}}{L} \cdot \Delta_{OH} + \frac{2 \cdot P_{H_2}}{L} \cdot \Delta_{H_2} + \frac{P_H}{L} \cdot \Delta_H - 1 \cdot \Delta_{M_T} = (-1) \cdot [\ln(L) - \ln(M_T) - \ln(b_H)]^0, \quad (2.39)$$

$$\text{де } L = 2 \cdot P_{H_2O} + P_{OH} + 2 \cdot P_{H_2} + P_H;$$

$$\text{для } [O] \quad \frac{P_{CO}}{G} \Delta_{CO} + \frac{2 \cdot P_{CO_2}}{G} \Delta_{CO_2} + \frac{P_{H_2O}}{G} \Delta_{H_2O} + \frac{P_{OH}}{G} \Delta_{OH} + \frac{2 \cdot P_{O_2}}{G} \Delta_{O_2} + \frac{P_{NO}}{G} \Delta_{NO} + \frac{P_o}{G} \Delta_o - 1 \cdot \Delta_{M_T} = (-1) \cdot [\ln(G) - \ln(M_T) - \ln(b_o + \alpha \cdot \chi_0^w \cdot 0.419)]^0, \quad (2.40)$$

$$\text{де } G = P_{CO} + 2 \cdot P_{CO_2} + P_{H_2O} + P_{OH} + 2 \cdot P_{O_2} + P_{NO} + P_o;$$

для [N] [N]

$$\frac{2 \cdot P_{N_2}}{J} \cdot \Delta_{N_2} + \frac{P_{NO}}{J} \cdot \Delta_{NO} + \frac{P_N}{J} \cdot \Delta_N - 1 \cdot \Delta_{M_T} = (-1) \cdot [\ln(J) - \ln(M_T) - \ln(\alpha \cdot \chi_0^w \cdot 1.581)]^0, \quad (2.41)$$

$$\text{де } J = 2 \cdot P_{N_2} + P_{NO} + P_N;$$

$$\text{для } [P_\Sigma] \quad \frac{P_{CO}}{R} \Delta_{CO} + \frac{P_{CO_2}}{R} \Delta_{CO_2} + \frac{P_{H_2O}}{R} \Delta_{H_2O} + \frac{P_{OH}}{R} \Delta_{OH} + \frac{P_{H_2}}{R} \Delta_{H_2} + \frac{P_{O_2}}{R} \Delta_{O_2} + \frac{P_{N_2}}{R} \Delta_{N_2} + \frac{P_{NO}}{R} \Delta_{NO} + \frac{P_C}{R} \Delta_C + \frac{P_H}{R} \Delta_H + \frac{P_o}{R} \Delta_o + \frac{P_N}{R} \Delta_N = (-1) \cdot [\ln(R) - \ln(P_\Sigma)]^0, \quad (2.42)$$

$$\text{де } R = P_{CO} + P_{CO_2} + P_{H_2O} + P_{OH} + P_{H_2} + P_{O_2} + P_{N_2} + P_{NO} + P_C + P_H + P_o + P_N.$$

Рішення будується з припущення про ізоентальпійність процесу в камері згоряння (топці) енергетичного обладнання. Для обраної пари пального окиснювач з відомими для них ентальпіями $I^{(r)}$ і $I^{(o)}$ заданою величиною χ^w (2.8) мольного коефіцієнта співвідношення компонентів обчислюється ентальпія палива

$$I^{(T)} = I^{(r)} + \chi^w \cdot I^{(o)}. \quad (2.43)$$

Далі процес рішення здійснюється у відповідності з наступним алгоритмом:

1. Обирається деяка температура T^0 (початкове наближення). Вона вважається за реалізовану в розглянутий момент в камері згоряння $T_i = T^0$.

2. За допомогою ітераційного процесу на основі моделі, яку лінеаризують, (2.30-2.42), визначається склад (парціальні тиски P_i , а, отже, і молярні частки) продуктів згоряння, відповідний до поточної розглянутої температури T_i . Як зазначалося раніше, необхідні для цього розрахунку значення констант хімічної рівноваги можуть бути взяті з таблиць або розраховані за допомогою апроксимаційних поліномів, подібних до наведених в [31].

3. Визначаються ентальпії продуктів згоряння I_i , відповідні до поточної розглянутої температури T_i . Ці величини можуть бути також взяті з таблиць або розраховані за допомогою апроксимаційних поліномів, подібних до наведених в [31].

4. Використовуючи значення парціальних тисків як величини мольних часток відповідних газів, що входять до складу продуктів згоряння, обчислюється їх ентальпія $I_{пс}$

$$I_{пс} = \sum_w (P_i \cdot I_i). \quad (2.44)$$

5. Порівнюються величини ентальпій палива і продуктів згоряння при поточній температурі, що розглядається. Слід враховувати, що використані для розрахунку $I_{пс}$ значення парціальних тисків чисельно дорівнюють

мольним концентраціям тільки в тому випадку, коли розглядається M_T молей палива. Іншими словами, порівняння ентальпій має відбуватися у вигляді співвідношення $M_T \cdot I^{(T)} \Leftrightarrow I_{ПС}$.

6. У разі рівності цих величин або допустимої величини відхилення температура і склад продуктів згоряння **вважаються визначеними. Розрахунок зупиняється.** В іншому випадку переходимо до наступного пункту.

7. В залежності від перевищення лівої чи правої частини виразу $M_T \cdot I^{(T)} \Leftrightarrow I_{ПС}$ відбувається коригування значення поточної температури T_i , що розглядається, в бік її збільшення або зменшення. З новим значенням величини T_i переходимо до пункту 2 алгоритму і всі розрахунки повторюємо.

В основу розрахунків покладено припущення про ізоентальпійність процесу горіння палива. Такий стан спостерігається лише в окремих енергетичних установках. Наприклад, в камерах згоряння рідинних ракетних двигунів (РРД) за рахунок спеціальним чином організованої системи охолодження. Такий підхід може бути реалізований і при розрахунку процесів в циліндрі двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) в межах одного такту його роботи. Це обумовлюється швидкістю процесів, що протікають, і, відповідно, малою часткою втрат через стінки циліндра. У переважній більшості енергетичних пристроїв умови ізоентальпійності процесу горіння не здійсненні. З цієї причини для досліджень розроблено спеціальний пристрій, на який отримано патент [14].

2.3 Перевірка працездатності моделі для визначення температури і складу продуктів згоряння кисневмісних горючих. Оцінка достовірності отриманих результатів

Перевірка працездатності виконана шляхом вирішення відповідної задачі для трьох типів кисневмісних горючих, що включає до свого складу:

- хімічно зв'язаний кисень – на прикладі етилового спирту;
- кисень у вигляді індивідуальної, активної речовини – на прикладі суміші метану з повітрям, яка може утворюватися при дегазації шахт;
- хімічно зв'язаний кисень, який входить до складу негорючої частини суміші газів – на прикладі газу, котрий утворюється при бродінні в метантенку.

2.3.1. Визначення температури і складу продуктів згоряння етилового спирту в повітрі

Етиловий спирт як паливо для розв'язання задачі обраний через його широке поширення та наявність результатів, придатних для перевірки адекватності розробленої моделі. Так в [121] наведені результати розрахунку процесу горіння етилового спирту в повітрі при зміні α в діапазоні 0,7...1,4. Виконані розрахунки, що охоплюють більш широкий діапазон зміни α 0,5...2. Зробимо Порівняння розрахованої температури і величини парціальних тисків деяких газів. Частину речовин для порівняння оберемо виходячи з їх вагової частки в складі продуктів згоряння. Це пов'язано з тим, що саме вони в основному визначають ентальпію газової суміші, а отже, і її температуру. Врахуємо величини парціальних тисків окису вуглецю (чадного газу) і окису азоту. Це пов'язано з тим, що вони визначають шкідливі викиди продуктів згоряння.

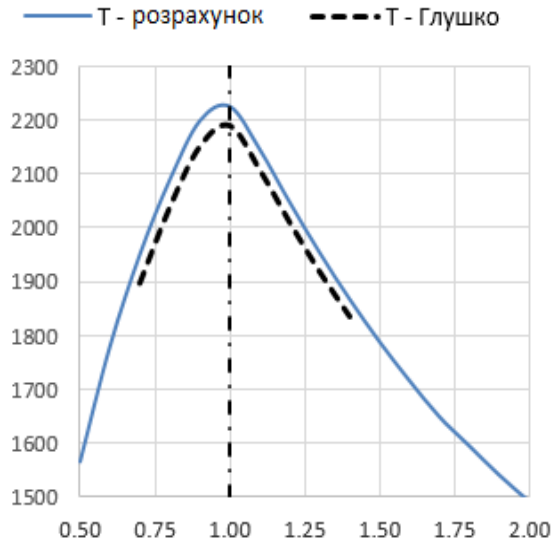
Раніше виконано обґрунтування врахування в складі повітря тільки кисню та азоту. Крім того, в розрахунках будуть задані умови застосування спирту зі 100 % концентрацією. Це зроблено для спрощення моделі і розрахунків на її основі. На практиці це не відповідає дійсності і спирт завжди

містить в своєму складі деяку кількість води. Так в [121] наведені результати для випадку спирту з 5 % вмістом H_2O . Крім того, враховується вміст у повітрі деякої кількості аргону і вуглекислого газу (сумарно в межах 1 %). Відхилення закладених в розрахунки умов від даних довідника [121] дозволить оцінити чутливість розробленої моделі до похибки завдання вихідних даних.

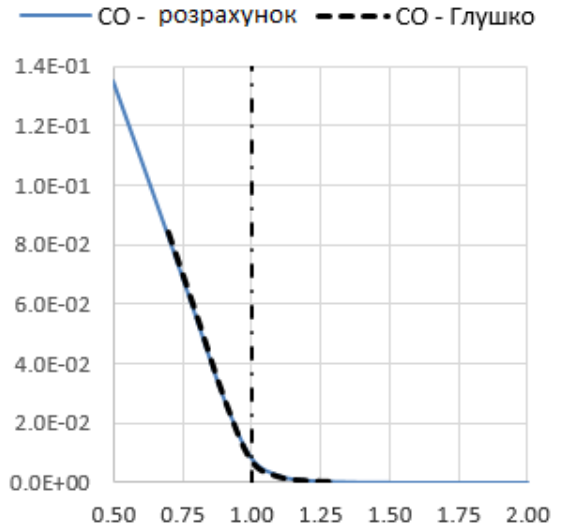
Для перевірки адекватності розробленої моделі в (табл. 2.2) наведені результати розрахунку на її основі (2.30–2.42) для різних значень α . В (табл. 2.3) наведені дані, взяті з [121]. На (рис. 2.1) наведені графіки результатів розрахунків параметрів продуктів згоряння (безперервні лінії) і дані, взяті з [121] (пунктирні лінії). Штрихпунктирною лінією відмічено положення, що відповідає стехіометричному співвідношенню компонентів $\alpha = 1$.

Таблиця 2.2 – Результати розрахунку визначення складу на основі парціальних тисків і температури продуктів згоряння етилового спирту в повітрі на основі моделі (2.30–2.42) для різних значень α

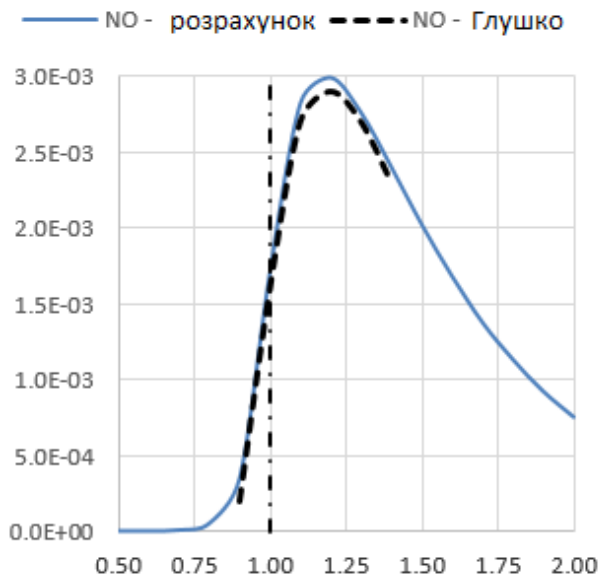
α	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
T, K	1567	1781	1951	2089	2198	2225	2146	2048
P_{CO}	1,35E-01	1,09E-01	8,29E-02	5,58E-02	2,86E-02	8,38E-03	2,36E-03	7,74E-04
P_{CO2}	5,23E-02	6,03E-02	7,18E-02	8,64E-02	1,03E-01	1,13E-01	1,10E-01	1,03E-01
P_{H2O}	1,35E-01	1,60E-01	1,76E-01	1,84E-01	1,85E-01	1,78E-01	1,66E-01	1,55E-01
P_{OH}	3,71E-07	7,77E-06	6,04E-05	2,84E-04	1,04E-03	2,43E-03	2,37E-03	1,71E-03
P_{H2}	1,46E-01	9,41E-02	5,61E-02	2,93E-02	1,17E-02	2,96E-03	8,48E-04	2,96E-04
P_{O2}	1,08E-11	3,73E-09	2,45E-07	7,68E-06	2,08E-04	4,27E-03	1,64E-02	2,99E-02
P_{N2}	5,31E-01	5,76E-01	6,13E-01	6,44E-01	6,70E-01	6,88E-01	6,98E-01	7,06E-01
P_{NO}	9,45E-09	4,26E-07	6,11E-06	5,10E-05	3,51E-04	1,72E-03	2,83E-03	2,99E-03
P_C	3,77E-20	3,61E-18	4,62E-17	1,68E-16	1,81E-16	2,05E-17	5,54E-19	1,42E-20
P_H	1,40E-05	9,02E-05	2,65E-04	4,86E-04	5,93E-04	3,47E-04	1,17E-04	3,75E-05
P_O	2,62E-11	5,09E-09	1,85E-07	2,95E-06	3,21E-05	1,73E-04	2,03E-04	1,37E-04
P_N	1,99E-13	1,80E-11	3,19E-10	2,33E-09	9,40E-09	1,31E-08	5,07E-09	1,40E-09
M_T	9,38E-02	8,48E-02	7,73E-02	7,11E-02	6,57E-02	6,09E-02	5,62E-02	5,21E-02



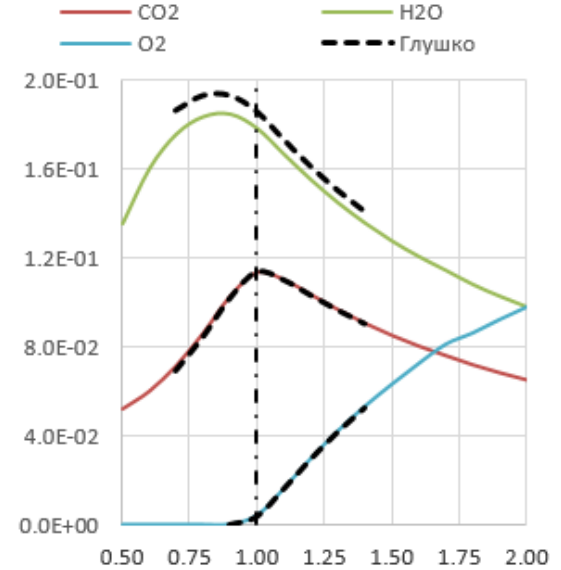
а



б



в



г

Рисунок 2.1 – Результати розрахунків і дані з довідника [121] для продуктів згоряння етилового спирту в повітрі при різних значеннях α : а – температура; б – парціальний тиск окису вуглецю; в – парціальний тиск окису азоту; г – парціальних тисків вуглекислого газу, водяної пари і вільного кисню

Порівняння графіків показує якісний збіг розглянутих результатів. Помітні розбіжності спостерігаються для температури (рис. 2.1, а) і парціального тиску парів води (рис. 2.1, г). Кількісну величину цих розбіжностей можна оцінити з даних, наведених в (табл. 2.4.).

Таблиця 2.4 – Відносні відхилення для величин процесу спалювання етилового спирту в повітрі між результатами розрахунків та даними з [121].

α	0.7			1.0			1.4		
	Розрахунок	Глушко	ε	Розрахунок	Глушко	ε	Розрахунок	Глушко	ε
T, K	1951	1897	2.8 %	2225	2190	1.6%	1869	1835	1.8%
P_{CO}	8.29E-02	8.42E-02	0.1%	8.38E-03	7.50E-03	0.1%			
P_{NO}				1.72E-03	1.60E-03	0.0%	2.40E-03	2.30E-03	0.0%
P_{CO2}	7.18E-02	6.91E-02	0.3%	1.13E-01	1.14E-01	0.0%	9.06E-02	9.03E-02	0.0%
P_{H2O}	1.76E-01	1.86E-01	1.1%	1.78E-01	1.86E-01	0.8%	1.36E-01	1.41E-01	0.5%
P_{O2}				4.27E-03	3.60E-03	0.1%	5.32E-02	5.28E-02	0.0%

Відхилення у визначенні температури і парціального тиску парів води можна пояснити відмінностями в складі пального, прийнятого в розрахунках і використаного при отриманні даних для довідника [121]. Зміст в останньому випадку 5 % води веде до зменшення ентальпії в порівнянні з 100 % спиртом і, як наслідок, до зниження температури продуктів згоряння. Саме це і спостерігається на (рис. 2.1, а). Дані, наведені в (табл. 2.4), показують, що відносна відмінність розглянутих температур не перевищують 2.8 %. Похибка визначалася щодо величини розрахованої температури. Ця величина дозволяє оцінити параметричну чутливість розробленої моделі: 5 % зміни складу пального веде до 2.8 % відхилення величини розрахованої температури. Аналогічна причина лежить в основі відхилення у визначенні парціального тиску парів води (рис. 2.1, з). Саме наявність 5 % води в пальному веде до перевищення величин даних з довідника [121] в порівнянні з розрахованими величинами. Відносна похибка не перевищує 1.1 %. Це відображено в (табл. 2.4). Похибка визначена щодо тиску в камері згоряння (топці). У розрахунках вона була прийнята рівною 1 бар. Всі інші похибки розглянутих величин (табл. 2.4) менше зазначених вище.

Пусті графи в (табл. 2.4) обумовлені відсутністю даних в [121]. При записі величин відносних похибок ε відображалася тільки одна значуща цифра

після коми. Більша їх кількість при інженерних розрахунках не має підстав. Такий підхід, а так само, і малі похибки привели до появи нульових значень похибок в (табл. 2.4).

Всі обчислені і наведені в (табл. 2.4) похибки $< 5 \%$, що відповідає допустимій точності інженерних розрахунків [6; 8; 13]. Це дозволяє використовувати дані, наведені в (табл. 2.2), в якості розширеної, в порівнянні з [121], основи для визначення складу і температури продуктів згоряння етилового спирту в повітрі при різних α .

2.3.2. Визначення температури і складу продуктів згоряння метано-повітряної суміші в повітрі

Метано-повітряна суміш (МПС) або близька до неї за складом може утворюватися при дегазації шахт. Суміш горюча і потенційно може бути використана в якості палива в енергетичному обладнанні. МПС як пальне для вирішення модельної задачі обрана через наявність результатів, придатних для перевірки адекватності розробленої моделі. Горіння такої суміші в повітрі можна звести до спалювання чистого метану в повітрі. Відповідні дані по температурі і складу продуктів згоряння при зміні α в діапазоні 0,6...1,5 наведені, наприклад, в [121].

Додатково для підтвердження адекватності моделі в (табл. 2.5) наведені результати розрахунку на основі моделі (2.30–2.42) для різних значень α . В (табл. 2.6) наведені дані, взяті з [121]. На (рис. 2.2) в графічному вигляді наведені результати розрахунку параметрів продуктів згоряння (безперервні лінії) і дані, взяті з [121] (пунктирні лінії). Штрихпунктирною лінією відмічено положення, відповідне стехіометричному співвідношенню компонентів.

Таблиця 2.5 – Результати розрахунку визначення складу продуктів згоряння метану в повітрі на основі моделі (2.30–2.42) для різних значень α

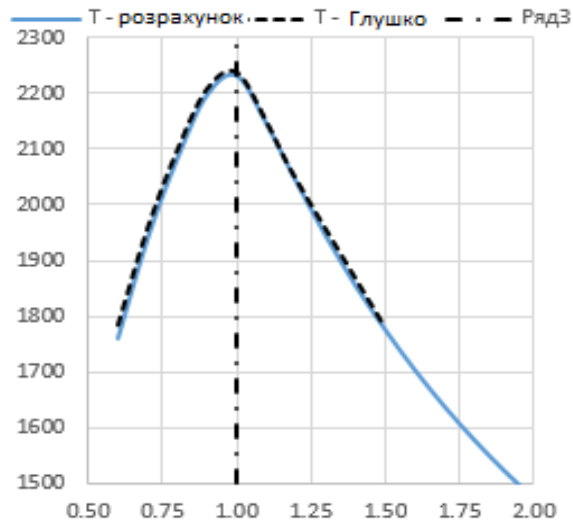
α	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3
T, [K]	1761	1940	2084	2198	2232	2145	2041	1944
P _{CO}	9.41E-02	7.28E-02	5.03E-02	2.64E-02	7.10E-03	1.80E-03	5.58E-04	1.92E-04
P _{CO2}	3.88E-02	4.79E-02	6.03E-02	7.56E-02	8.71E-02	8.49E-02	7.96E-02	7.43E-02
P _{H2O}	1.47E-01	1.69E-01	1.83E-01	1.88E-01	1.84E-01	1.71E-01	1.59E-01	1.48E-01
P _{OH}	5.10E-06	4.65E-05	2.39E-04	9.36E-04	2.47E-03	2.40E-03	1.69E-03	1.10E-03
P _{H2}	1.18E-01	7.18E-02	3.79E-02	1.50E-02	3.35E-03	8.61E-04	2.86E-04	1.06E-04
P _{O2}	1.35E-09	1.16E-07	4.25E-06	1.31E-04	3.84E-03	1.66E-02	3.06E-02	4.33E-02
P _{N2}	6.02E-01	6.38E-01	6.68E-01	6.93E-01	7.10E-01	7.19E-01	7.25E-01	7.30E-01
P _{NO}	2.44E-07	4.16E-06	3.81E-05	2.84E-04	1.68E-03	2.88E-03	3.01E-03	2.74E-03
P _H	2.71E-18	4.39E-17	1.81E-16	2.09E-16	2.09E-17	4.09E-19	8.61E-21	2.11E-22
P _O	8.49E-05	2.77E-04	5.35E-04	6.69E-04	3.83E-04	1.18E-04	3.53E-05	1.10E-05
P _C	2.52E-09	1.17E-07	2.12E-06	2.55E-05	1.71E-04	2.02E-04	1.32E-04	7.35E-05
P _N	1.27E-11	2.75E-10	2.22E-09	9.52E-09	1.44E-08	5.07E-09	1.29E-09	3.12E-10
M _T	1.33E-01	1.21E-01	1.11E-01	1.02E-01	9.42E-02	8.67E-02	8.02E-02	7.45E-02

Продовження таблиці 2.5

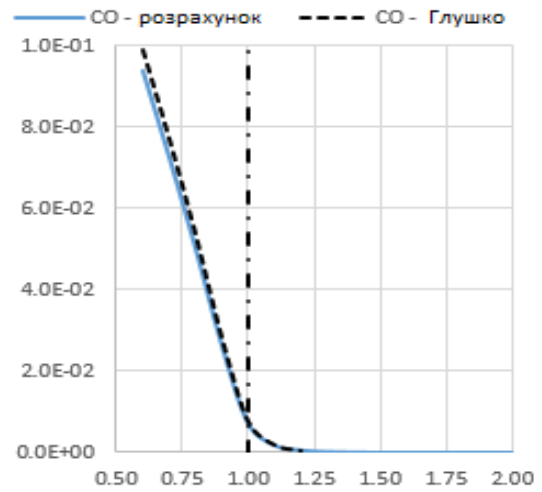
α	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
T, [K]	1855	1776	1703	1638	1578	1523	1473
P _{CO}	6.96E-05	2.69E-05	1.07E-05	4.35E-06	1.82E-06	7.79E-07	3.39E-07
P _{CO2}	6.95E-02	6.52E-02	6.14E-02	5.80E-02	5.50E-02	5.22E-02	4.98E-02
P _{H2O}	1.39E-01	1.30E-01	1.23E-01	1.16E-01	1.10E-01	1.04E-01	9.95E-02
P _{OH}	6.92E-04	4.36E-04	2.74E-04	1.73E-04	1.09E-04	6.95E-05	4.45E-05
P _{H2}	4.19E-05	1.75E-05	7.50E-06	3.31E-06	1.50E-06	6.92E-07	3.25E-07
P _{O2}	5.46E-02	6.42E-02	7.29E-02	8.06E-02	8.75E-02	9.37E-02	9.93E-02
P _{N2}	7.35E-01	7.38E-01	7.41E-01	7.44E-01	7.47E-01	7.49E-01	7.51E-01
P _{NO}	2.35E-03	1.96E-03	1.61E-03	1.31E-03	1.06E-03	8.54E-04	6.88E-04
P _H	5.67E-24	1.80E-25	6.04E-27	2.21E-28	8.70E-30	3.64E-31	1.62E-32
P _O	3.50E-06	1.17E-06	4.01E-07	1.41E-07	5.05E-08	1.85E-08	6.91E-09
P _C	3.86E-05	2.00E-05	1.03E-05	5.26E-06	2.70E-06	1.39E-06	7.22E-07
P _N	7.45E-11	1.84E-11	4.58E-12	1.17E-12	3.03E-13	8.04E-14	2.18E-14
M _T	6.96E-02	6.52E-02	6.14E-02	5.80E-02	5.50E-02	5.22E-02	4.98E-02

Таблиця 2.6 – Результати розрахунку визначення складу продуктів згорання метану в повітрі з [121]

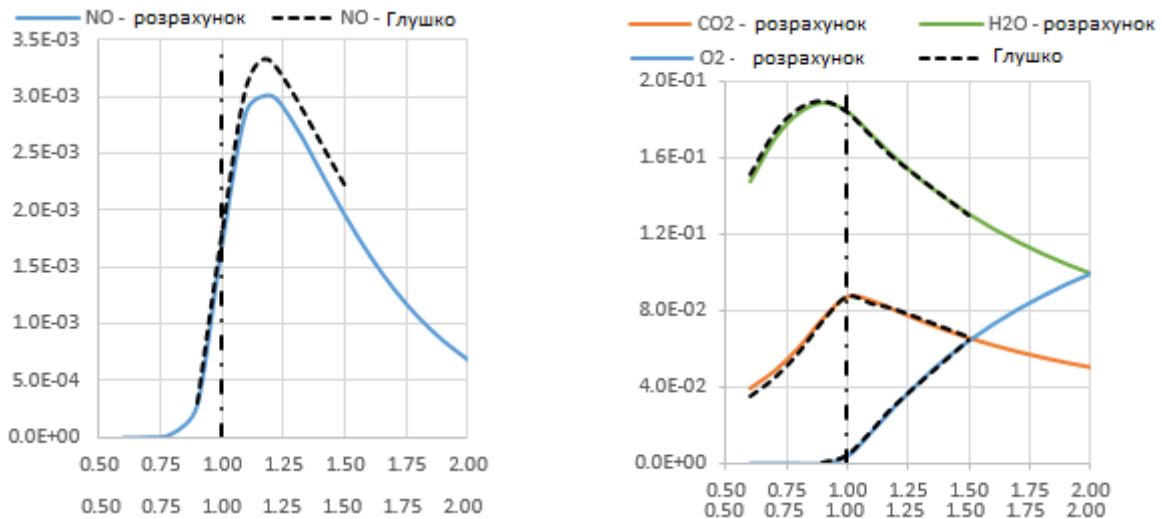
α	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.5
T, [K]	1784	1958	2098	2208	2239	2152	2048	1782
P _{CO}	9.88E-02	7.71E-02	5.37E-02	2.83E-02	7.80E-03	2.00E-03	6.00E-04	
P _{CO2}	3.46E-02	4.42E-02	5.75E-02	7.43E-02	8.70E-02	8.32E-02	8.01E-02	6.57E-02
P _{H2O}	1.51E-01	1.73E-01	1.86E-01	1.90E-01	1.84E-01	1.71E-01	1.59E-01	1.30E-01
P _{OH}			3.00E-04	1.00E-03	2.50E-03	2.40E-03	1.70E-03	4.00E-04
P _{H2}	1.14E-01	6.77E-02	3.48E-02	1.34E-02	3.00E-03	8.00E-04	3.00E-04	
P _{O2}				1.00E-04	3.90E-03	1.65E-02	3.04E-02	6.41E-02
P _{N2}	5.94E-01	6.30E-01	6.60E-01	6.85E-01	7.02E-01	7.10E-01	7.16E-01	7.29E-01
P _{NO}				3.00E-04	1.80E-03	3.10E-03	3.30E-03	2.20E-03
P _C								
P _H		2.00E-04	4.00E-04	5.00E-04	3.00E-04			
P _O					2.00E-04	2.00E-04	1.00E-04	
P _N								



a



б



в

з

Рис. 2.2 – Результати розрахунків і дані з довідника [121] для продуктів згоряння метану в повітрі при різних значеннях α : а – температура; б – парціальний тиск окису вуглецю; в – парціальний тиск окису азоту; з – парціальних тисків вуглекислого газу, водяної пари і вільного кисню

Порівняння графіків показує хороший якісний і кількісний збіг розглянутих результатів. Суттєвих розбіжностей не спостерігається ні для однієї з розглянутих величин. Розбіжності в порівнюваних величинах, які спостерігаються на (рис. 2.2, в) знаходяться в межах допустимої похибки. Вона зумовлена малістю представлених на цьому графіку величин.

Підтвердженням цьому можуть служити дані, наведені в (табл. 2.7), що відображають ряд параметрів розглянутих процесів при деяких значеннях α і відносні відхилення між ними. Величини похибок для температур визначені відносно до відповідної розрахованої температури. Величини похибок для парціальних тисків визначені щодо тиску в камері згоряння (топці). У розрахунках вона була прийнята рівною 1 бар.

Таблиця 2.7 – Відносні відхилення для величин процесу спалювання метану в повітрі між результатами розрахунків та даними з [121]

α	0.6			1.0			1.5		
	Розрахунок	Глушко	ε	Розрахунок	Глушко	ε	Розрахунок	Глушко	ε
T, K	1761	1784	1.3%	2232	2239	0.3%	1776	1782	0.3%
P_{CO}	9.41E-02	9.88E-02	0.5%	7.10E-03	7.80E-03	0.1%			
P_{NO}				1.68E-03	1.80E-03	0.0%	1.96E-03	2.20E-03	0.0%
P_{CO2}	3.88E-02	3.46E-02	0.4%	8.71E-02	8.70E-02	0.0%	6.52E-02	6.57E-02	0.0%
P_{H2O}	1.47E-01	1.51E-01	0.4%	1.84E-01	1.84E-01	0.0%	1.30E-01	1.30E-01	0.0%
P_{O2}				3.84E-03	3.90E-03	0.0%	6.42E-02	6.41E-02	0.0%

Пусті графі в (табл. 2.7) так само, як і в (табл. 2.4), обумовлені відсутністю даних в [121]. При записі величин відносних похибок ε відображалася тільки одна значуща цифра після коми. Більша їх кількість при інженерних розрахунках не має підстав. Такий підхід, а так само малі похибки привели до появи нульових значень похибок в (табл. 2.7).

Всі обчислені та наведені в (табл. 2.7) похибки $< 5\%$, що відповідає допустимій точності інженерних розрахунків. Це дозволяє використовувати дані, наведені в (табл. 2.4.), в якості розширеної, в порівнянні з [121], основи для визначення складу і температури продуктів згоряння метану в повітрі при різних α .

2.3.3. Визначення температури і складу продуктів згоряння метантенкових газів бродіння в повітрі

Гази бродіння органічних відходів в метантенках характеризуються непостійністю свого складу. Це пояснюється змінністю складу органічних відходів в процесі бродіння, коливанням температури бродіння. Як правило якісний склад суміші газів, що утворюється, відомий. Кількісний склад

вказується приблизно, у вигляді деякого діапазону. Так, наприклад, в [122] він визначений у вигляді чистого метану: до 60...70 %, вуглекислого газу: до 26...34 %, азоту: до 1...3 %, водню: до 1...3 % при теплотворній здатності 5000...6500 ккал/м³.

В літературі не знайдено даних за складом продуктів згоряння газів – продуктів бродіння в метантенках, подібних, наведеним в (табл. 2.2.) і (табл. 2.5.). Було виконано відповідні розрахунки на основі моделі (2.30–2.42). З цією метою конкретизуємо склад наведеної вище суміші газів. Використовувана модель побудована з розрахунку входження кисню в склад, і пального, і окиснювача. У той же час вважається, що азот входить до складу лише окиснювача (повітря). Для можливості використання моделі в такому вигляді і в випадку, що розглядається, приймемо таке ж припущення. Раніше деякий об'єм вуглекислого газу, аргону та інших домішок в повітрі, які не беруть участі в хімічних реакціях процесу горіння, був замінений відповідним об'ємом азоту, так само є практично інертним по відношенню до реакцій, які протікають. Для даної суміші газів замінимо азот на вуглекислий газ. З урахуванням цього приймемо для розгляду наступний склад суміші: метан – 60 %, вуглекислий газ – 37 %, водень – 3 %.

Розрахуємо ентальпію суміші, умовну формулу пального і стехіометричний коефіцієнт співвідношення пального та окиснювача. Склад суміші газів рахується в об'ємних відсотках. При цьому молярні об'єми будь-яких газів однакові і $V^{\mu} = 22.4$ л. Мольні ентальпії газів, що входять до складу даної суміші, становлять: для метану $I_{CH_4} = -66.63$ (кДж/моль) [123], для вуглекислого газу $I_{CO_2} = -393.14$ (кДж/моль) [123], для водню $I_{H_2} = 0$ [33]. З урахуванням обраного для розгляду складу суміші ентальпію одного її молу $I_{см}^{\mu}$ розрахуємо із співвідношення

$$I_{см}^{\mu} = I_{CH_4} \cdot 0.6 + I_{CO_2} \cdot 0.37 + I_{H_2} \cdot 0.03 = -185.4 \text{ (кДж/моль)}. \quad (2.45)$$

Для визначення умовної формули пального (умовної формули суміші газів) розрахуємо умовні формули її складових з урахуванням їх об'ємних часток

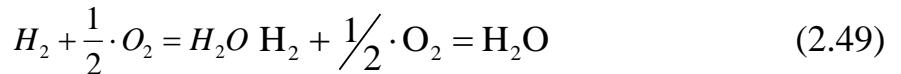
$$\begin{aligned} \text{для } CH_4 &\Rightarrow C_{1 \cdot 0.6} H_{4 \cdot 0.6} \Rightarrow C_{0.6} H_{2.4} , \\ \text{для } CO_2 &\Rightarrow C_{1 \cdot 0.37} O_{2 \cdot 0.37} \Rightarrow C_{0.37} O_{0.74} , \\ \text{для } H_2 &\Rightarrow H_{2 \cdot 0.03} \Rightarrow H_{0.06} . \end{aligned} \quad (2.46)$$

Далі знайдемо суму показників кількості атомів при однакових елементах. В результаті отримаємо умовну формулу пального

$$C_{0.97} H_{2.46} C_{0.74} . \quad (2.47)$$

На підставі цієї формули розрахуємо молярну масу суміші газів $\mu = 25.95$ і, з урахуванням (2.45), її питому ентальпію $I_{cm}^{num} = -7144.5$ (кДж/кг).

Розрахуємо стехіометричний коефіцієнт співвідношення компонентів. Для цього розглянемо можливі реакції горіння



Виходячи зі складу суміші в одному її молі міститься

$$22.4 \text{ л} \cdot 60\% = 13.44 \text{ л} \quad CH_4$$

$$22.4 \text{ л} \cdot 3\% = 0.67 \text{ л} \quad H_2$$

Відповідно до (2.48) і (2.49) на стехіометричну реакцію горіння такої кількості метану і водню буде потрібно така кількість кисню:

$$\text{для } CH_4 \quad 13.44 \text{ л} \cdot 2 = 26.88 \text{ л},$$

$$\text{для } H_2 \quad 0.67 \text{ л} \cdot 0.5 = 0.33 \text{ л},$$

і всього загальна кількість 27.2 л. Відповідно до прийнятого раніше складу повітря це складе 21 % від загального його об'єму, який становить 129.5 л. Враховуючи, що мольний об'єм газу дорівнює $V^m = 22.4$ л, визначаємо кількість молей повітря, необхідних для стехіометричного спалювання 1 молю даної газової суміші. Це і буде мольним стехіометричним коефіцієнтом співвідношення компонентів

$$\chi_0'' = 5.8. \quad (2.50)$$

Використовуючи отримані дані, визначимо склад продуктів згоряння і їх температуру при різних значеннях α . Результати визначення складу наведені в (табл. 2.8).

Таблиця 2.8 – Результати визначення складу продуктів згоряння суміші газів з метантенка в повітрі на основі моделі (2.30–2.42) для різних значень α

α	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7
T, K	1577	1764	1918	2046	2108	2025	1930	1843	1764	1692	1626	1564
P_{CO}	1.10E-01	8.37E-02	5.61E-02	2.81E-02	5.42E-03	1.11E-03	3.36E-04	1.15E-04	4.29E-05	1.65E-05	6.55E-06	2.59E-06
P_{CO_2}	8.57E-02	9.56E-02	1.09E-01	1.25E-01	1.37E-01	1.30E-01	1.22E-01	1.14E-01	1.06E-01	1.00E-01	9.45E-02	8.96E-02
P_{H_2O}	1.62E-01	1.76E-01	1.83E-01	1.84E-01	1.78E-01	1.66E-01	1.54E-01	1.44E-01	1.35E-01	1.27E-01	1.20E-01	1.14E-01
P_{OH}	6.68E-07	9.64E-06	6.70E-05	3.34E-04	1.33E-03	1.35E-03	9.44E-04	6.18E-04	3.93E-04	2.48E-04	1.56E-04	9.75E-05
P_{H_2}	8.60E-02	5.10E-02	2.67E-02	1.05E-02	1.72E-03	3.68E-04	1.20E-04	4.46E-05	1.79E-05	7.48E-06	3.21E-06	1.38E-06
P_{O_2}	5.70E-11	1.11E-08	6.85E-07	3.23E-05	2.74E-03	1.59E-02	2.95E-02	4.21E-02	5.25E-02	6.21E-02	7.08E-02	7.95E-02
P_{N_2}	5.56E-01	5.93E-01	6.25E-01	6.52E-01	6.72E-01	6.83E-01	6.91E-01	6.99E-01	7.04E-01	7.10E-01	7.15E-01	7.22E-01
P_{NO}	2.32E-08	7.02E-07	9.35E-06	9.41E-05	1.03E-03	2.02E-03	2.12E-03	1.94E-03	1.66E-03	1.39E-03	1.15E-03	9.34E-04
P_C	2.00E-20	9.31E-19	7.70E-18	1.50E-17	1.34E-18	1.61E-20	3.08E-22	7.58E-24	2.19E-25	6.89E-27	2.30E-28	7.42E-30
P_H	1.20E-05	5.73E-05	1.44E-04	2.21E-04	1.33E-04	3.59E-05	1.05E-05	3.29E-06	1.07E-06	3.60E-07	1.23E-07	4.16E-08
P_O	6.83E-11	7.44E-09	2.36E-07	4.44E-06	6.38E-05	8.41E-05	5.42E-05	3.05E-05	1.62E-05	8.41E-06	4.32E-06	2.17E-06
P_N	2.57E-13	1.33E-11	1.93E-10	1.31E-09	3.06E-09	1.00E-09	2.45E-10	5.95E-11	1.45E-11	3.58E-12	8.88E-13	2.16E-13
M_T	2.02E-01	1.85E-01	1.70E-01	1.58E-01	1.47E-01	1.36E-01	1.26E-01	1.17E-01	1.10E-01	1.03E-01	9.75E-02	9.24E-02

Як зазначено вище, не знайдені дані, подібні наведеним в [121], необхідні для оцінки похибки розрахунків в даному випадку. Використаємо наведену в [122] величину теплотворної здатності даної суміші, яка може змінюватися в діапазоні 5000...6500 ккал/м³ або 20900...27170 кДж/м³. Ця величина відповідає стехіометричній реакції горіння при $\alpha = 1$. Розрахуємо теплотворну здатність реакції при чисельному розрахунку і порівняємо ці дві величини. Для цього з [123; 33] розрахуємо мольні ентальпії продуктів згоряння I_{TC} при розрахованій температурі $T=2108$ К і їх же мольні ентальпії утворення при нормальних умовах I_{298} . Різниця цих двох величин ($I_{TC} - I_{298}$) визначає кількість енергії у формі тепла, що виділяється при утворенні одного моля продукту згоряння, яке розглядається в процесі горіння вихідної газової

суміші. Розрахунок на основі моделі (2.30–2.42) виконується для умов чисельної рівності величин парціальних тисків P_i продуктів згоряння їх мольним концентраціям. Добуток $P_i \cdot (I_{PC} - I_{298})_i$ визначає величину енергії, що виділяється при утворенні відповідного продукту згоряння в процесі горіння. Сума цих величин $Q_{\Sigma} = \sum [P_i \cdot (I_{PC} - I_{298})_i]$ дає загальну кількість енергії, що виділяється в процесі горіння. Умова чисельної рівності парціальних тисків P_i продуктів згоряння і їх мольних концентрацій виконується для деякої кількості молей пального M_T , також визначається в процесі розрахунку. Знання величин $\sum [P_i \cdot (I_{PC} - I_{298})_i]$ і M_T дозволяє визначити кількість енергії Q_{μ} , що виділяється при згорянні 1 молу пального. Той факт, що в якості пального виступає суміш газів з фіксованим мольним об'ємом в $22.4 \text{ л} = 0.0224 \text{ м}^3$ в кінцевому підсумку дозволяє розрахувати теплотворну здатність реакції для 1 м^3 вихідного пального. Результатом є $Q_{\text{м}^3} = 20860 \text{ кДж/м}^3$. Ця величина практично співпадає з нижньою межею діапазону її зміни, наведеною в [122] і зазначеною вище. Визначення в розрахунку нижньої межі можна пояснити тим, що у вихідних даних для розрахунку було прийнято мінімальну кількість метану і максимальну кількість баластних газів. Проміжні результати описаних розрахунків наведені в (табл. 2.9).

Практичний збіг наведеної в [122] і розрахованої величини теплотворної здатності підтверджує придатність моделі (2.30–2.42) в випадку, що розглядається [6; 8; 13].

Таблиця 2.9 – Результати розрахунку теплотворної здатності продуктів згоряння суміші газів з метантенку в повітрі на основі моделі (2.30–2.42) для випадку $\alpha = 1$

Склад	P	I _{ПС}	I ₂₉₈	I _{ПС-I₂₉₈}	P*(I _{ПС-I₂₉₈})		
	бар / моль	$\left[\frac{\text{кДж}}{\text{моль}} \right]$	$\left[\frac{\text{кДж}}{\text{моль}} \right]$	$\left[\frac{\text{кДж}}{\text{моль}} \right]$	$\left[\frac{\text{кДж}}{\text{моль}} \right]$		
P _{CO}	0.0054	-41.23	-101.94	60.71	3.29E-01		
P _{CO2}	0.1370	-286.09	-384.05	97.97	1.34E+01		
P _{H2O}	0.1781	-153.27	-231.99	78.73	1.40E+01		
P _{OH}	1.33E-03	105.67	48.10	57.57	7.63E-02		
P _{H2}	0.0017	65.13	8.54	56.59	9.73E-02		
P _{O2}	2.74E-03	71.99	8.62	63.37	1.74E-01		
P _{N2}	0.6725	68.66	8.59	60.07	4.04E+01		
P _{NO}	1.03E-03	162.26	100.31	61.94	6.39E-02		
P _C	1.34E-18	760.91	723.20	37.70	5.04E-17		
P _H	1.33E-04	261.82	224.20	37.62	4.99E-03		
P _O	6.38E-05	293.85	255.85	38.00	2.42E-03	Q _μ	Q _{μ³}
P _N	3.06E-09	516.50	478.87	37.63	1.15E-07	$\left[\frac{\text{кДж}}{\text{моль}} \right]$	$\left[\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3} \right]$
M _T	0.14679		$\Sigma[P_i (I_{\text{ПС}}-I_{298})_i]=$		6.86E+01	467.23	20859

2.4 Висновки до другого розділу

1. Математична модель на підставі рівнянь виду (2.30–2.42) для газоподібного палива дозволяє визначити кількісний склад його умовної формули, ентальпію палива, склад продуктів згоряння при використанні в якості вихідних даних величини заміряних технологічних параметрів (витрат компонентів палива, температур, що їм відповідають в камері згоряння), відомого елементного (якісного) складу палива ($[C]$, $[H]$, $[O]$, і т.д.).

2. Математична точність моделі дозволяє використовувати отримані на її основі дані для оцінки чутливості результатів розрахунків на неточність вимірювального каналу вихідних технологічних параметрів.

3. При вирішенні реальних технологічних задач, ентальпії і ентропії продуктів згоряння мають визначатися якомога точніше на підставі таблиць або програмних комплексів, що заповнюють подібного роду таблиці. Поліноміальні залежності для визначення ентальпій і ентропій продуктів згоряння, внаслідок значних похибок апроксимації, не можуть бути використані для вирішення розширеної задачі.

РОЗДІЛ 3

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕПЛОВИМ НАВАНТАЖЕННЯМ БАРАБАННОГО КОТЛА ДЛЯ СПАЛЮВАННЯ ГОРЮЧИХ КИСНЕВМІСНИХ ВУГЛЕВОДНЕВИХ ГАЗІВ

Даний розділ присвячено вдосконаленню типової системи управління тепловим навантаженням барабанних котлів, а також розгляду можливості використання горючих кисневмісних вуглеводневих газів в якості палива. Використання компресорної установки для нагнітання горючих газів в топку, дозволить розширити існуючий діапазон регулювання теплового навантаження, коли пропускна здатність регулюючого органу обмежена. Вдосконалена математична модель динаміки барабанних котлів дозволить виконати математичне моделювання роботи вдосконаленої системи управління для групи барабанних котлів, які працюють на загальний паропровід.

3.1. Аналіз існуючих схем управління і визначення можливості використання сучасних технічних засобів і алгоритмів керування для вирішення поставленого завдання

Згідно з експертним прогнозом зростання світової економіки, попит на енергетичні ресурси може збільшитися на 36 % на протязі 2011 — 2030 років. Ключовими факторами підвищення енергоспоживання будуть зростання чисельності населення планети (до 8,3 млрд. до 2030 року) і зростання глобального ВВП (в два рази, в порівнянні з 2011 роком). Швидка

індустріалізація та урбанізація країн з низьким і середнім рівнем доходу складе 70 % від світового зростання ВВП і понад 90 % зростання світового попиту на енергетичні ресурси. Логічне, пропорційне зростанню ВВП, збільшення попиту на енергію обмежене безперервним поліпшенням енергоефективності її використання. Зниження енергоємності виробництва забезпечуватиметься використанням відновлюваних енергоресурсів, сланцевих енергоносіїв і нових, більш досконалих технологій виробництва промислових товарів і переробки сировини в біоенергетичних системах [124].

Для сучасної української держави, з урахуванням особливостей її географічного положення та наявності певного виду енергоресурсів, перспективним напрямком модернізації та розвитку енергетичної галузі може стати реалізація заходів, які потребують малих загальних витратних та тих, що швидко окупаються та дозволяють без залучення значних коштів, в найкоротші терміни, зменшити споживання палива і електроенергії. До таких заходів можна віднести використання на існуючих парових котлах, працюючих на органічному паливі, модернізованих АСУ, які дозволять використовувати в якості палива горючі кисневмісні вуглеводневі гази.

Горючі кисневмісні вуглеводневі гази отримують як з твердого палива, так і з продуктів бродіння та анаеробного розкладання. У більшості випадків ці гази є побічним продуктом як хімічного або металургійного виробництва, так і новітніх біоенергетичних технологій. Вони економічно не вигідні для передачі на далекі відстані, так як мають малу і непостійну теплотворну здатність (табл. 3.1).

У вирішенні завдання спалювання палива зі змінним хімічним складом треба виділити кілька основних напрямків: конструкційний, технологічний і аналітичний. Провідними світовими розробниками технологій спалювання синтез-газів є Siemens, General Electric і Mitsubishi Heavy Industries, які пропонують спалювати штучні гази в газотурбінних установках (ГТУ) з удосконаленими камерами згоряння [110]. Також розглядається можливість модернізації самих пальникових пристроїв з метою зміни геометрії факелу, де

в конструкції пальника використовується ефект взаємодії газових струменів з поперечним потоком повітря, що набігає. [125].

Таблиця 3.1 – Густина і теплотворна здатність штучних газів

Газ	Густина, кг/м ³	Теплотворна здатність, МДж/м ³
Коксовий	0,342	17,58
Сланцевий	1,040	13,85
Генераторний мішаний	1,141	5,15
Генераторний, отриманий при паро-кисневому дугті під тиском	0,576	15,70
Домений	1,283	4,10
Газ, отриманий шляхом низькотемпературного коксування з бітумінозного вугілля	0,620	31,90
Газ анаеробного походження	1,16	20,86

Інший підхід пов'язаний з модифікацією самого палива – розведенням синтез-газу азотом, паром або продуктами згоряння [112], що виконується для підвищення потужності ГТУ, за рахунок збільшення масової витрати продуктів згоряння через газову турбіну або підвищення потужності паротурбінної частини, завдяки підвищенню масових витрат димових газів через котел-утилізатор. Також, можливе додавання в низькосортне паливо активаторів горіння (анаклариду) з одночасним поліпшенням системи подачі палива в топку [29].

Економічний ефект, також, може бути досягнуто за рахунок розроблення індивідуальної технологічної схеми підготовки і подачі штучного газу до місця спалювання, в тому числі і схеми проміжного відбору теплоти на

виробництво електроенергії не з кінцевого агрегату спалювання штучного газу, а з проміжної точки його часткового охолодження [113]. У разі наявності кількох споживачів газоподібного палива можна розподілити теплове навантаження між групою котлів, що працюють на загальний паропровід, в залежності від калорійності газу, що спалюється. В основі такого рішення лежить мінімізація цільової функції, яка враховує ймовірність відмови обладнання і максимальну ефективність його використання [114].

Аналітичний підхід пов'язаний з визначення хімічного складу горючого газу за допомогою математичної моделі процесу спалювання палива з відомим якісним складом [115]. Подальше вдосконалення математичного методу визначення складу горючого газу дозволяє пом'якшити обмеження по використовуваному паливу і реалізувати таку ідею у вигляді технічного пристрою [116]. Цей підхід дозволить удосконалити існуючі системи нелінійного управління котлоагрегатом, в яких екстремальний регулятор аналізує поточні витрати палива, повітря і пара, і визначає оптимальне співвідношення компонентів газо-повітряної суміші [97].

В даний час в країні на теплових електростанціях, оснащених барабанними котлами, промислових і теплофікаційних котельнях для підтримки заданої продуктивності пари використовується типова АСУ теплового навантаження (рис. 3.1). Завдання АСУ полягає в підтримці заданого тиску перегрітої пари, коли барабанний котел працює в регулюючому режимі або заданої витрати перегрітої пари, якщо котел працює в базовому режимі. Така АСУ, як правило, реалізується в двох модифікаціях: з сигналом по витраті палива, коли на пальникові пристрої подається рідке або газоподібне паливо з постійною теплотворною здатністю, і з сигналом по тепловиділенню в котельній камері, коли використовується тверде паливо або якісний склад рідкого або газоподібного палива не є постійним [40].

Можливість АСУ теплового навантаження з сигналом по тепловиділенню компенсувати внутрішні топкові збурення питомою

теплотою згорання палива обмежена пропускною здатністю регулюючого органу, яка не перевищує 20 % від номінальної витрати природного газу [7; 8; 9]. Також, необхідно враховувати густину і теплотворну здатність штучних газів, які можуть відрізнятися від аналогічних властивостей природного газу ($\rho_{\text{шт}} = 0,68 \dots 0,85 \text{ кг/м}^3$, $Q_H^{\text{шт}} = 28 \dots 46 \text{ МДж/м}^3$) як в більшу, так і в меншу сторону (див. табл. 3.1).

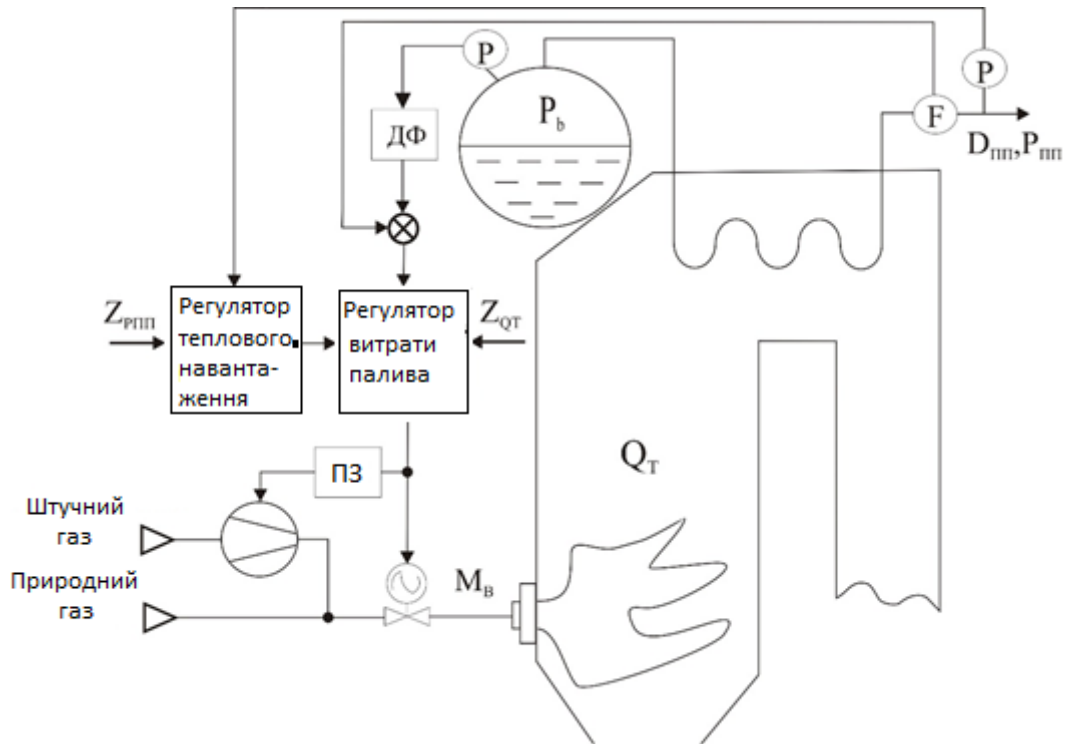


Рисунок 3.1 – Принципова схема управління тепловим навантаженням з сигналом по теплоті

Максимальна об'ємна витрата газу, приведена до нормальних умов ($P = 1,033 \text{ кгс/см}^2$, $\theta = 0^\circ \text{C}$), через регулюючий орган (РО) визначається рівнянням

$$Q_{\text{max}} = 535 K_g^{\text{max}} \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{PO}} P_2}{\rho T_1 k'}}, \quad (3.1)$$

де K_g^{max} – максимальна пропускна здатність РО, $\text{м}^3/\text{год.}$, ΔP_{PO} – перепад тиску на РО, кгс/см^2 , P_2 – тиск середовища після РО, кгс/см^2 , ρ – густина газу, кг/м^3 , T_1 – температура газу перед РО, К , k' – коефіцієнт стикованості.

Оскільки K_g^{\max} , P_2 , T_1 , k' в процесі роботи котельного обладнання практично не змінюються, то рівняння (3.1) можна записати у вигляді

$$Q_{max} = K_{PO} \sqrt{\frac{\Delta P_{PO}}{\rho}}, \quad (3.2)$$

де K_{PO} – постійний коефіцієнт, що визначає максимальне споживання газу на пальникові пристрої в залежності від перепаду тиску на РО і густини газу, м³/год.

З урахуванням теплотворної здатності газу Q_H^P тепловиділення в котельній камері буде визначатися рівнянням

$$Q_T = Q_H^P Q_{max} = Q_H^P K_{PO} \sqrt{\frac{\Delta P_{PO}}{\rho}}. \quad (3.3)$$

Якщо прийняти, що тиск газу в газопроводі підтримується постійним, то тепловиділення в котельній камері при повністю відкритому РО буде залежати тільки від густини газу і його теплотворної здатності. Відношення тепловиділення природного газу Q_T^{PR} до тепловиділення штучного газу Q_T^{SHG} дозволяє визначити потенційну можливість використання існуючого котельного обладнання для спалювання альтернативного газоподібного палива

$$\frac{Q_T^{SHG}}{Q_T^{PR}} = \frac{Q_H^P SHG}{Q_H^P PR} \sqrt{\frac{\rho_{SHG}}{\rho_{PR}}}. \quad (3.4)$$

Проведено розрахунки і отримано відношення (3.4) для середньої густини ($\rho_{SHG} = 0,765$ кг/м³) та середнього тепловиділення природного газу ($Q_H^P PR = 37$ МДж/м³) (табл. 3.2).

Результати розрахунку показують, що тільки газ, отриманий шляхом низькотемпературного коксування з бітумінозного вугілля, може бути використаний замість природного газу (додаткове відкриття регулюючого органу для забезпечення номінальної генерації пари складе 4 %).

Таким чином, виникає науково-технічна задача по збільшенню діапазону керуючого впливу АСУ тепловим навантаженням з сигналом по

теплоті, з метою використання в якості палива горючих кисневмісних вуглеводневих газів, коли пропускна здатність регулюючого органу не в змозі забезпечити подачу на пальникові пристрої необхідної кількості такого газу [7; 8; 9].

Таблиця 3.2 – Відношення тепловиділення природного газу до тепловиділення штучного газу

Вид газу	$Q_T^{пг} / Q_T^{штг}$	Перевищення пропускної здатності, %
Коксовий	1,41	21
Сланцевий	3,11	191
Генераторний мішаний	8,77	757
Генераторний, отриманий при парокисневому дутті під тиском	2,04	84
Доменний	11,7	1050
Газ, отриманий шляхом низькотемпературного коксування з бітумінозних вугілляв	1,04	–
Газ анаеробного походження	2,18	98

Одним із способів збільшення пропускної здатності регулюючого органу є збільшення перепаду тиску на ньому. Технічно цього можна досягти, якщо газ подавати на пальники з допомогою компресора, який, за рахунок підвищення тиску газу перед повністю відкритим регулюючим органом, збільшує витрату i , таким чином, компенсує його низьку теплотворну здатність i (або) велику густину.

Для вирішення поставленого завдання необхідно визначити структуру і параметри ПЗ (див. рис. 3.1), який повинен управляти продуктивністю газового компресора таким чином, щоб після вичерпання пропускної здатності РО, компресор збільшив подачу газу в топкову камеру за сигналом від

регулятора витрати палива і це не призвело б до зниження якості регулювання (збільшення тривалості перехідного процесу і великим динамічним відхиленням тиску P_{III} і витрати D_{III} перегрітої пари). Передбачається, що завдання по управлінню роботою димососа і дуттьового вентилятора вирішуються відповідними типовими АСУ. Ці АСУ керують продуктивністю по нагнітання повітря в топку і видаленню димових газів[7; 8; 9].

3.2 Визначення загальної структури об'єкта управління

В даній технологічній ділянці барабанного котла можна виділити наступні структурні елементи: компресор і газопровід кисневмісного вуглеводневого газу, регулюючий орган, через який проходить газ, топкова камера з екранними поверхнями нагріву, барабан котла і паропровід. Регульованими параметрами для цієї ділянки є тиск перегрітої пари P_{III} і тепловиділення в котельній камері Q_T ; управляючим впливом – положення РО по витраті газоподібного палива h_{PO} або число оборотів приводу компресора n ; впливами, що збурюють – теплотворна здатність палива (внутрішнє збурення) і теплове навантаження споживача пари (зовнішнє збурення). Для управління технологічною ділянкою використовується двоконтурна схема регулювання з стабілізуючим регулятором витрати палива і коригуючим регулятором тиску перегрітої пари (див. рис. 3.1).

Грунтуючись на роботах [114], [126] і з урахуванням особливостей обраної схеми регулювання, можна записати систему лінійних диференціальних рівнянь у відхиленнях для регульованої ділянки. Рівняння

балансу для газового компресора і ділянки газопроводу від нього до топкової камери

$$T_{ГП} \Delta \dot{Q}_{ШГ} + \Delta Q_{ШГ} = T_K \Delta \dot{n} + k_K \Delta n, \quad (3.5)$$

де $T_{ГП}$ – інерційність газопроводу, с, k_K – коефіцієнт передачі між числом оборотів n і об'ємною витратою штучного газу $Q_{ШГ}$, м³/об.

Тепловиділення в топковій камері для природного та штучного газу визначається як

$$\Delta Q_F = Q_T^{ШГ} K_{PO} \Delta h_{PO} + Q_T^{ШГ} \Delta Q_{ШГ} + Q_{ШГ} \Delta Q_T^{ШГ}. \quad (3.6)$$

Передача тепла в топковій камері до пароводяної суміші в екранних поверхнях нагріву

$$T_T \Delta \dot{Q}_T + \Delta Q_T = k_F \Delta Q_F, \quad (3.7)$$

де T_T – час запізнювання процесу теплопередачі, що враховує ефект акумуляції тепла в металевих конструкціях барабана котла, с, k_F – коефіцієнт передачі між кількістю теплоти, що виділилася при спалюванні газоповітряної суміші, і кількістю тепла сприйнятого пароводяної сумішшю в поверхнях нагріву, Вт/Вт.

Залежність тиску пари в барабані котла P_b від кількості тепла, отриманого пароводяною сумішшю, і витратою пари до споживача D_{III}

$$T_B \Delta \dot{P}_b = k_T \Delta Q_T + k_D \Delta D_{III}, \quad (3.8)$$

де T_B – час запізнювання процесу генерації пари в барабані котла, с, k_T , k_D – коефіцієнти передачі між тепловим сприйняттям і навантаженням, відповідно, Па/Вт, (Па·с)/кг.

Рівняння, яке враховує інерційність процесу передачі тепла від місця генерації (барабана котла) до споживача

$$T_{III} \Delta \dot{P}_{III} + \Delta P_{III} = k_{III} \Delta P_b; \quad (3.9)$$

$$T_{III} \Delta \dot{D}_{III} + \Delta D_{III} = k_{III} \Delta P_b, \quad (3.10)$$

де T_{III} – час запізнювання паропроводу, c , k_{III} , k_{IV} – коефіцієнти передачі між зміною тиску в барабані котла зміною тиску та витрати перегрітої пари, відповідно, Па/Па, кг/(Па·с).

На підставі рівнянь (3.5) – (3.10) може бути складена параметрична схема об'єкта управління (рис. 3.2). Вона показує, що основним неконтрольованим збуренням є зміна теплотворної здатності газу $\Delta Q_T^{шг}$ та густини $\rho_{шг}$.



Рисунок 3.2 – Параметрична схема об'єкту управління

Збурення зміною теплотворної здатності палива усувається в типовій АСУ регулятором палива, який використовують в зворотному від'ємному зв'язку, що утворюється від сигналу по теплоті

$$\Delta Q_T^{3M} = C_{II} \frac{dP_b}{dt} + \Delta D_{III},$$

де C_{II} – сталий коефіцієнт, який характеризує здатність акумулювати пароводяної суміші і металу випарної частини котла, кг/(кгс/см) [7; 8; 9].

3.2.1 Деталізація математичного опису типового об'єкту управління

У відповідності до конструкції котлів розглянутого класу аналітичну модель котлоагрегату доцільно представити у вигляді набору теплообмінників: топкової камери, фестону, котельного пучка, барабана, пароперегрівача і економайзера.

Зважаючи на складність прямого розгляду нелінійної динаміки котла в нестационарних режимах його роботи при створенні моделі для цілей управління котлом доводиться приймати такі спрощення, як представлення вказаних елементів конструкції у вигляді лінійних математичних моделей з зосередженими параметрами.

При розрахунку і моделюванні роботи удосконаленої і типової систем автоматичного регулювання, масова витрата палива на пальникових пристроях однозначно визначатиметься положенням відповідних регулюючих клапанів [2; 3; 4; 10].

3.2.1.1 Математичний опис технологічних ділянок і об'єкта управління

Завдання топкового пристрою котельного агрегату полягає в тому, щоб забезпечити максимально повне спалювання палива, що надходить, і перетворити приховану енергію палива в тепло. При цьому приймається, що кожен елемент відрізняється температурами, як робочого тіла, так і газів, що утворюються при горінні. У топці одночасно існує потік енергії і потік речовини, між якими є певна залежність. Так, у разі зміни витрати палива ΔM_B або повітря ΔM_L , що надходить в камеру згоряння, і відхилення різниці температури повітря і навколишнього середовища $\Delta \vartheta_L$, кількість відведеного тепла ΔQ_F , (випромінюванням або з димовими газами) визначається наступним співвідношенням [127]

$$\Delta Q_F = k_1 \Delta M_B + k_2 \Delta M_L + k_3 \Delta \vartheta_L.$$

Це справедливо в припущенні (яке практично завжди виконується), що часом хімічного процесу горіння і фізичної теплотою палива можна знехтувати. У разі застосування несертифікованого палива (палива, зі змінною теплотворною здатністю, в нашому випадку, горючих кисневмісних вуглеводневих газів), до вказаного вище рівняння вводяться додаткові доданки:

$$\Delta Q_F = k_1 \Delta M_B + k_2 \Delta M_L + k_3 \Delta v_L + k_4 \Delta Q_{III} + k_5 \Delta Q_T^{III} \quad (3.11)$$

де $k_1 = Q_P^H$; $k_2 = c_{PL}(\bar{\vartheta}_L - 20)$; $k_3 = M_L c_{PL}$; $k_4 = Q_T^{III}$; $k_5 = Q_{III}$;

Q_P^H – нижча теплотворна здатність палива, Дж/м³;

c_{PL} – питома теплоємність повітря, Дж/(м³·К);

$\bar{\vartheta}_L$ – номінальна температура повітря після нагрівача повітря, °С;

M_L – номінальна витрата повітря, м³;

Q_T^{III} – теплотворна здатність несертифікованого палива, Дж/м³;

Q_{III} – номінальна витрата несертифікованого палива, Дж/м³.

Тепло, що виділяється в топці, передається як за допомогою інфрачервоного випромінювання поверхням нагріву, розташованим в топці (фронтний, задній і бічні екрани), так і димовими газами, які потім, в основному за допомогою конвекції, передають його іншим елементам котла (пароперегрівачу, повітрянагрівачу, економайзеру). Залежність теплопередачі променистим і конвективним теплообміном поверхням нагріву ΔQ_T від тепловиділення в топці ΔQ_F і витрати димових газів ΔM ($\Delta M = \Delta M_B + \Delta M_L$) може бути записана як

$$T_1 \Delta \dot{Q}_T + \Delta Q_T = k_1 \Delta Q_F + k_2 \Delta M \quad (3.12)$$

де $T_1 = \frac{m_1 c_1}{k_S + \bar{M}_1 c_1}$; $k_S = 4k(\bar{\vartheta}_T - 273)^3$; $k = \frac{\bar{Q}_T}{(\bar{\vartheta}_T + 273)^4 - (t_3^T + 273)^4}$; $k_1 = -\frac{k_S c_1 \bar{\vartheta}_T}{k_S + \bar{M}_1 c_1}$;

$k_2 = \frac{k_S}{k_S + \bar{M}_1 c_1}$;

m_1 – маса димових газів в топці котла, кг;

\bar{M}_1 – витрата димових газів в стаціонарному режимі, кг/с;

c_1 – питома теплоємність димових газів, Дж/(кг·К);

\bar{g}_T – температура димових газів в топці, К;

\bar{Q}_T – сприйняття тепла радіаційними і конвективними поверхнями нагріву, Вт;

t_3^T – усереднена температура зовнішніх стінок радіаційних і конвективних поверхонь нагріву, $t_3^T = t_H + (60...80)$, К;

t_H – температура насичення води в барабані котла.

Барабан, в якому відбувається генерація пари, представляє систему ємностей, що складається з власне барабана, опускної трубної системи і екранної трубної системи (підйомні труби). Ємності заповнені двофазним середовищем (вода і насичений пар).

До пароводяної суміші в барабані котла здійснюється приплив енергії від газів до стінки екранних труб, фєстону і котельного пучка ΔQ_T . До основного впливу, що збурює, слід віднести стік маси і енергії з потоком, який відводиться з барабана насиченої пари ΔD .

Таким чином, динамічна залежність для тиску в барабані котла ΔP_B

$$T_1 \Delta \dot{P}_B = k_1 \Delta D + k_2 \Delta Q_T \quad (3.13)$$

Де $T_1 = 1$; $k_1 = \frac{a_4 b_3 - a_2}{a_2 a_3 - a_4 a_1}$; $k_2 = -\frac{a_4}{a_2 a_3 - a_4 a_1}$; $b_3 = \bar{i}''$; $a_2 = \bar{\rho}' \bar{i}' - \bar{\rho}'' \bar{i}''$;

$$a_1 = \bar{V} \left[\frac{d(\rho'' i'')}{dP} \right]_0 + \bar{V}_w \left[\frac{d(\rho' i' - \rho'' i'')}{dP} \right]_0 + c_m m_m \left(\frac{d\theta'}{dP} \right)_0; a_3 = \bar{V} \left[\frac{d(\rho'')}{dP} \right]_0 + \bar{V}_w \left[\frac{d(\rho' - \rho'')}{dP} \right]_0;$$

$$a_4 = \bar{\rho}' - \bar{\rho}'';$$

\bar{V} – сумарний об'єм барабана, опускних і екранних труб, м³;

\bar{V}_w – сумарний об'єм води в барабані, опускних і екранних трубах, м³;

c_m – теплоємність металу труб і барабану при температурі насичення, Дж/(кг·К);

m_m – маса металу труб і барабану, кг;

$\bar{\rho}', \bar{\rho}''$ – густина води при температурі насичення і насиченої пари, кг/м³;

i', i'' – ентальпія води при температурі насичення і насиченої пари, Дж/кг;

\bar{P} – тиск пари в барабані, Па;

$\bar{\theta}'$ – температура насичення, К.

При роботі котла на загальну парову магістраль суттєвим є не тиск вологої пари ΔP_B в середині пароводяного тракту, а тиск перегрітої пари ΔP_M в паропроводі. Вхідними параметрами для моделі ділянки паропроводу є тиск на вході ΔP_B і виході ΔP з паропроводу.

Для розглянутого випадку диференціальні рівняння мають вигляд

$$T_1 \Delta \dot{P}_M + \Delta P_M = k_1 \Delta P_B + k_2 \Delta P. \quad (3.14)$$

Іншим вихідним параметром, зміну якого в перехідному процесі необхідно знайти, є витрата пари в паропроводі ΔD . Диференціальні рівняння, які описують вплив тиску пари на вході і виході магістралі, можуть бути записані як

$$T_2 \Delta \dot{D} + \Delta D = k_3 \Delta P_B + k_4 \Delta \dot{P} + k_5 \Delta P, \quad (3.15)$$

де $T_1 = T_t \frac{K}{\bar{\rho}} \frac{\partial \rho}{\partial P}$; $T_t = \frac{2m_{II}}{G_D}$; $T_2 = T_1$; $k_1 = \frac{K}{\delta P_1}$; $k_2 = \frac{K}{\delta P_2}$; $K = \frac{1}{\frac{\delta P}{\delta P_1 \delta P_2} + \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \rho}{\partial P}}$; $k_3 = \mu \sigma k_1$;

$$k_4 = -\sigma k_2 T'; \quad k_5 = -\sigma k_2; \quad T' = \frac{T_1^4}{k_2^4}; \quad T'_t = T' - \mu T_t; \quad \mu = \frac{1 - k_1}{k_1}; \quad \sigma = \frac{\bar{G}_D}{2\delta P_1};$$

$\bar{\rho}$ – густина пари в паропроводі, кг/м³;

m_{II} – маса пари в паропроводі, кг;

\bar{P} , \bar{P}_1 , \bar{P}_2 – тиск пари в паропроводі, перед ним та за регулюючим органом, Па;

\bar{t} – температура пари в паропроводі, К;

$\bar{\xi}_{кли}$ – наведений коефіцієнт гідравлічного опору клапана.

Таким чином, математична модель котла, в якому можуть спалюватися горючі кисневмісні вуглеводневі гази, спрощено описується системою диференціальних та алгебраїчних рівнянь (3.11) – (3.15). Особливістю вдосконаленої моделі динаміки барабанного котла є наявність двох незалежних вхідних параметрів – зміна витрати кисневмісного вуглеводневого газу ΔQ_{III} і зміна його теплотворної здатності ΔQ_T^{III} (рис. 3.3).

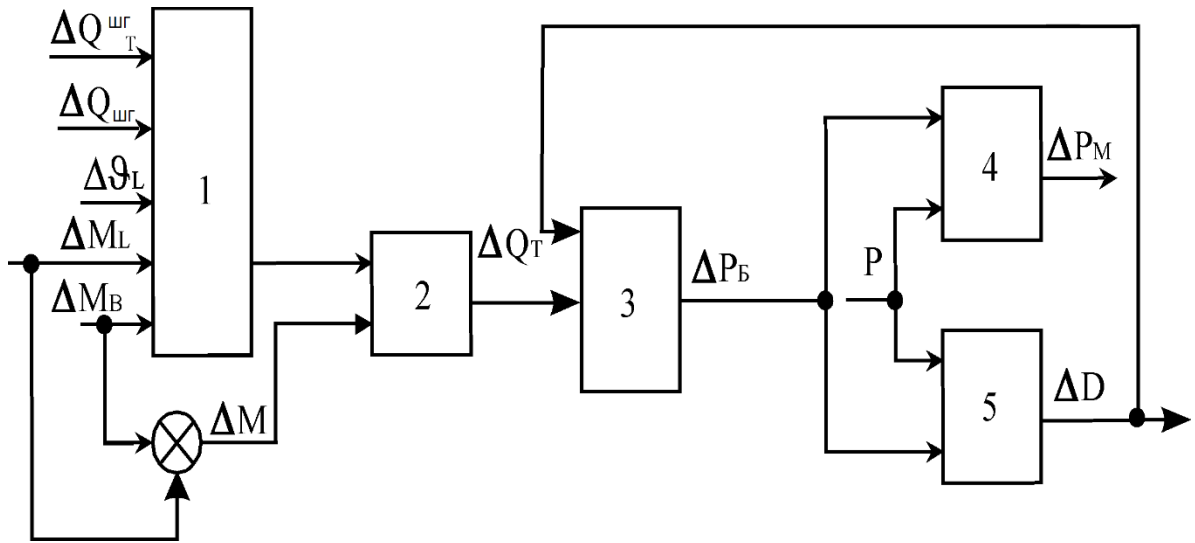


Рисунок 3.3 – Структурна схема математичної моделі барабанного котла, що враховує використання горючих кисневмісних вуглеводневих газів.

В блоці 1 структурної схеми описується зміна тепловиділення в топковій камері. Блок 2 моделі описує передачу тепла від димових газів і випромінювання факела до поверхонь нагріву. Блок 3 описує зміну тиску пари в барабані котла в залежності від тепловиділення в котельній камері і витрати пари споживачем. Блоки 4 та 5 моделі характеризує динамічні властивості паропроводу за тиском і витратою перегрітої пари, відповідно.

Для чисельного моделювання розрахунок коефіцієнтів диференціальних рівнянь математичної моделі виконано для барабанного котла ГМ-50, який працює на 100 % теплової потужності. Параметричну математичну модель використано для синтезу вдосконаленої системи управління теплого навантаження групи котлів, коли один з них працює в базовому, а інший – в регулюючому режимі роботи.

Для отримання математичної моделі двох котлів, які працюють на загальний паропровід, необхідно врахувати взаємний вплив генерації пари окремим котлом на загальний тиск в паропроводі, тобто

$$T_{III} \Delta \dot{P}_{III} + \Delta P_{III} = K_{III} \sum_{i=1}^N \Delta D_i, \quad (3.16)$$

де $K_{\text{пв}}$ – коефіцієнт, що враховує зміну тиску перегрітої пари в загальному паропроводі з зміною генерації пари окремого котла ΔD_i , (Па·с)/кг.

В отриману систему диференціальних рівнянь (3.11) — (3.16) необхідно включити рівняння первинних перетворювачів, які враховують інерційність вимірювального перетворювача і імпульсної лінії [2; 3; 4; 10].

3.2.1.2 Визначення структури пристрою зв'язку та принципової схеми управління

Для вдосконалення АСУ теплового навантаження барабанного котла введено новий елемент — компресор, який роташовано на лінії подачі газу, що спалюється перед пальниковим пристроєм. Керування компресором відбувається за рахунок зворотнього зв'язку з регулятора витрати палива через ПЗ (див рис 3.1). Це забезпечить плавний перехід на подачу горючих кисневмісних вуглеводневих газів за допомогою компресора, коли регулятор палива максимально відкриє регулюючий орган. У цьому випадку керуючий сигнал від регулятора палива, відповідно з яким до цього відбувалося переміщення регулюючого органу, повинен бути так змінити ПЗ, щоб його реалізація за допомогою компресора не призвела до істотної зміни властивостей об'єкта по регулюючому каналу.

За допомогою передатної функції можливе моделювання АСУ. В нашому випадку відношення передатної функції ділянки по каналу «зміна положення регулюючого клапана – тепловиділення в котельній камері» $W_{\Delta h_{\text{по}} \rightarrow \Delta Q_f}(S)$ до передатної функції ділянки по каналу «зміна продуктивності компресора – тепловиділення в котельній камері» $W_{\Delta n \rightarrow \Delta Q_f}(S)$ визначає вид ПЗ, коли управління здійснюється тільки одним барабанним котлом (див. рис. 3.1)

$$W_{ПЗ}(S) = \frac{Q_T^{III} K_{PO} (T_{III} S + 1)}{Q_T^{III} K_K \left(\frac{T_K}{K_K} S + 1 \right)}. \quad (3.17)$$

З урахуванням малої інерційності газових компресорів і розташовуючи компресор якомога ближче до котельного устаткування передатна функція ПЗ (3.17) може бути спрощена до виду

$$W_{ПЗ}(S) \approx \frac{Q_T^{III} K_{PO}}{Q_T^{III} K_K}. \quad (3.18)$$

Спрощена передатна функція ПЗ є пропорційною ланкою, однак наявність у виразі (3.18) значення теплотворної здатності природного і горючого кисневмісного вуглеводневого газів накладають певні обмеження для використання такої АСУ. В якості палива повинен використовуватися один вид горючого кисневмісного вуглеводневого газу або АСУ повинна бути доповнена пристроєм і методом ідентифікації, який визначає умовну формулу і теплотворну здатність газу, що спалюється [116].

У випадку, коли в технологічну ділянку входять два і більше барабанних котла, частину з них переводять в базовий режим роботи (котли генерують постійну кількість пари), а інша частина працює в регулюючому режимі, підтримуючи постійним тиск перегрітої пари в загальному паропроводі [40]. Застосування в цьому випадку для кожного котла окремого газового компресора економічно недоцільно. Рішенням може бути використання одного продуктивного компресора, який повинен підвищувати тиск кисневмісного вуглеводневого газу в загальному газопроводі (рис. 3.4). МУК відстежує становище РО котла, що працює в регулюючому режимі. У разі повного відкриття РО, МУК через відповідне ПЗ змінює завдання регулятора тиску газу в газопроводі для плавного збільшення продуктивності компресора. На підставі (3.2), можна визначити функціональну залежність зміни завдання регулятора тиску газу як

$$\Delta P_{PO} = \rho \left(\frac{Q}{K_{PO}} \right)^2, \quad (3.19)$$

де Q – необхідна витрата газу на пальникові пристрої, $\text{м}^3/\text{с}$.

Оскільки регулятор розрідження підтримує постійним тиск димових газів в котельній камері, то ΔP_{p0} при повністю відкритому РО буде залежати тільки від тиску газу в газопроводі. Отже, шукана залежність для сигналу завдання регулятора тиску буде мати вигляд

$$Z_p(t) = kQ^2(t). \quad (3.20)$$

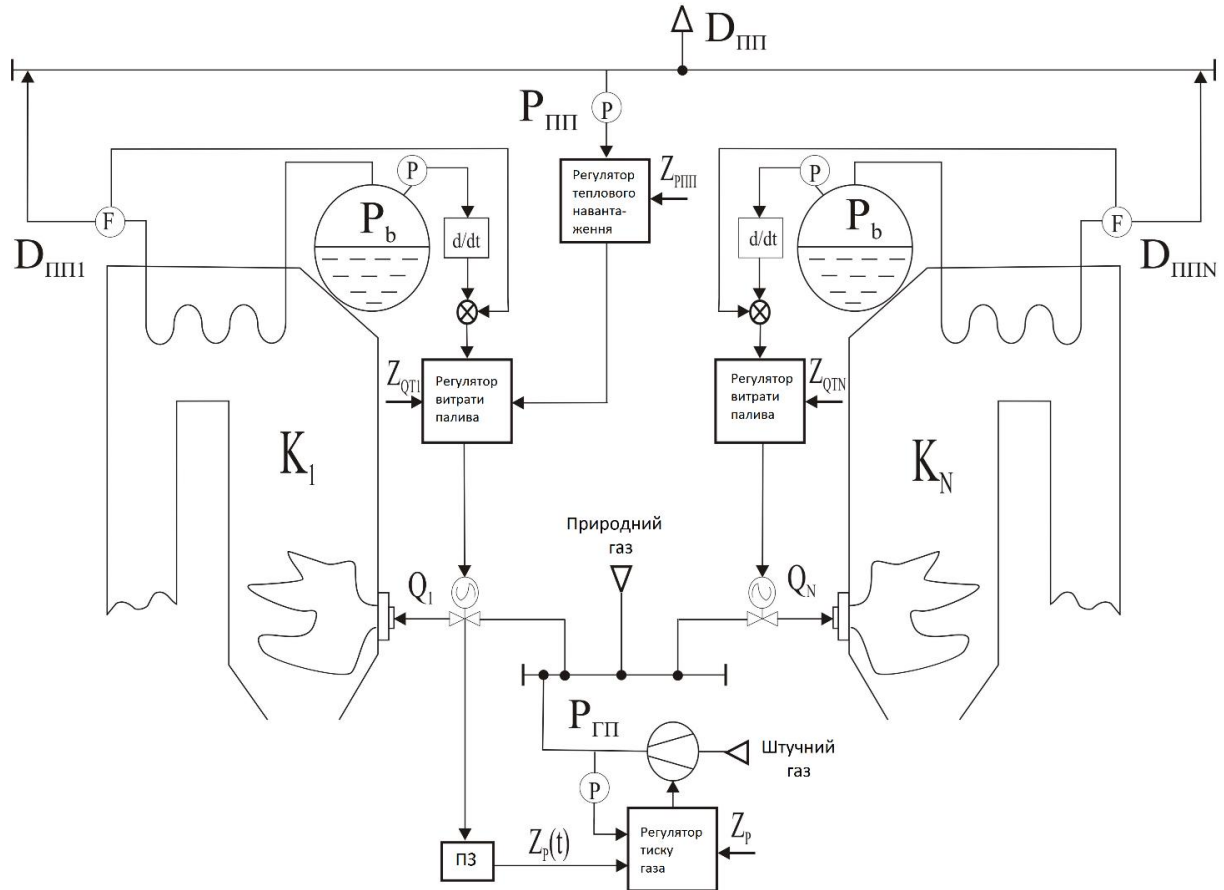


Рисунок 3.4 – Принципова схема управління тепловим навантаженням для групи котлів

Збільшення тиску в загальному газопроводі дозволить синхронно відновити продуктивність котлів, які працюють в базовому режимі [2; 3; 4; 10].

3.3 Порівняльний аналіз роботи групи барабанних котлів в регулюючому режимі з використанням удосконаленої системи управління тепловим навантаженням

Моделювання перехідних процесів було проведено для двох барабанних котлів, які працюють на загальний паропровід (див. рис. 3.4). При цьому котли працювали у режимах: один — в регулюючому режимі і стабілізував тиск перегрітої пари в паропроводі, другий — в базовому режимі з постійним паровим навантаженням. В якості збурення розглядалося стрибкоподібне збільшення витрат на пальникові пристрої кисневмісного вуглеводневого газу, яке призводить до зменшення тепловиділення в котельній камері і, як наслідок, генерації пари на 25 % від номінальної продуктивності. На рис. 3.5-3.9 наведено залежності втрати тиску та витрати робочої пари від часу для різних АСУ.

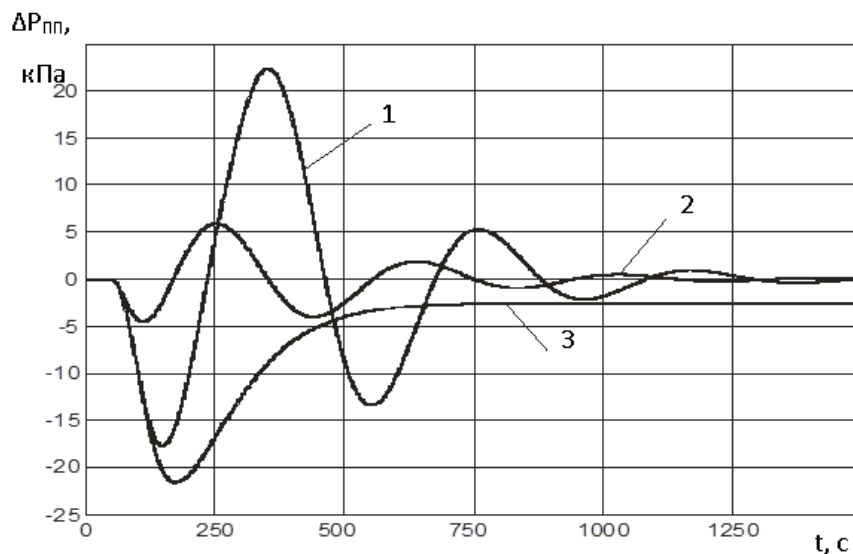


Рисунок 3.5 – Залежність тиску перегрітої пари у загальному паропроводі від часу

Оскільки запас по пропускну́й здатності регулюючих органів становить 20 %, то типова АСУ теплового навантаження не може відновити задане

значення тиску перегрітої пари в загальному паропроводі (рис. 3.5, крива 3) і необхідну витрату пари до споживача (рис. 3.6, крива 3).

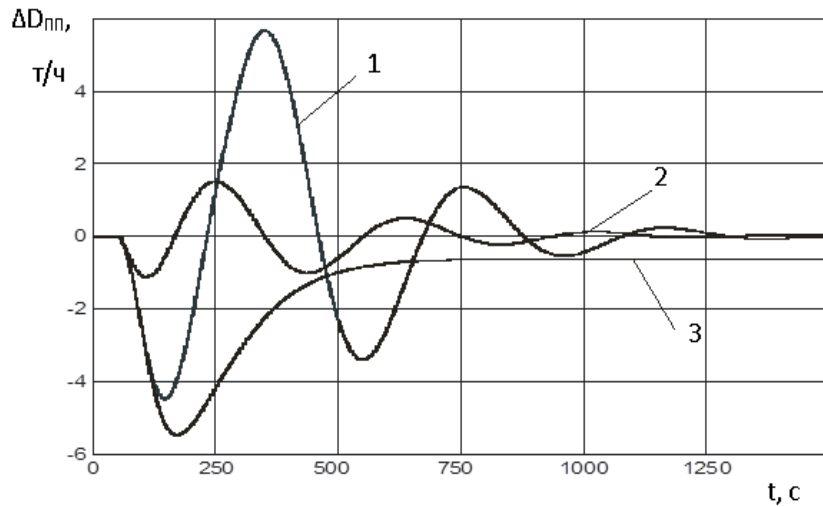


Рисунок 3.6 – Залежність витрат перегрітої пари у загальному паропроводі від часу

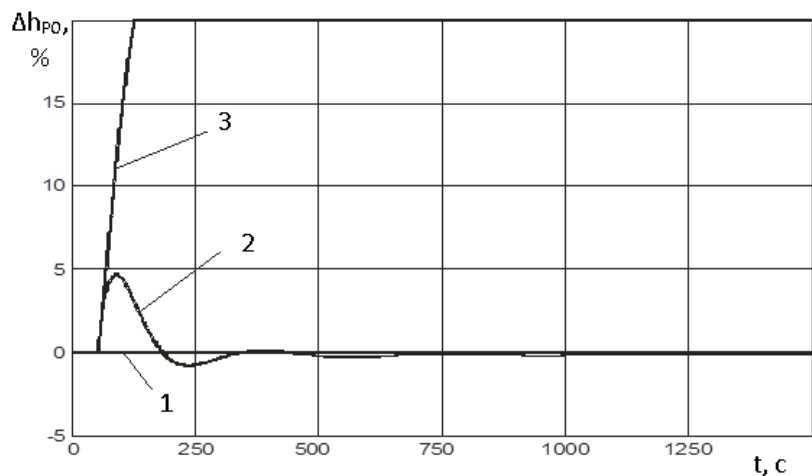


Рисунок 3.7 – Зміна положення РО барабанного котла в базовому режимі

У типовій системі управління регулятори витрати палива за сигналом про тепловиділення в камері згоряння повністю відкривають регулюючі органи (рис. 3.7–3.8, крива 3), але без додаткового підвищення тиску штучного газу в загальному газопроводі. Це не дозволяє повністю компенсувати зниження тепловиділення кожного котла.

Вдосконалена АСУ теплового навантаження дозволяє відновити вихідні тиск і генерацію перегрітої пари (див. рис. 3.6 – 3.7) за рахунок збільшення подачі штучного газу в топку за допомогою газового компресора. У разі, коли продуктивність газового компресора регулюється за допомогою регулятора теплового навантаження через пристрій зв'язку (див. рис. 3.1), розрахована за (3.18), динамічне відхилення витрати і тиску пари, і тривалість перехідного процесу в два рази більше (див. рис. 3.5 – 3.6, крива 1), у порівнянні зі схемою, в якій газовий компресор має власну систему управління (див. рис. 3.4).

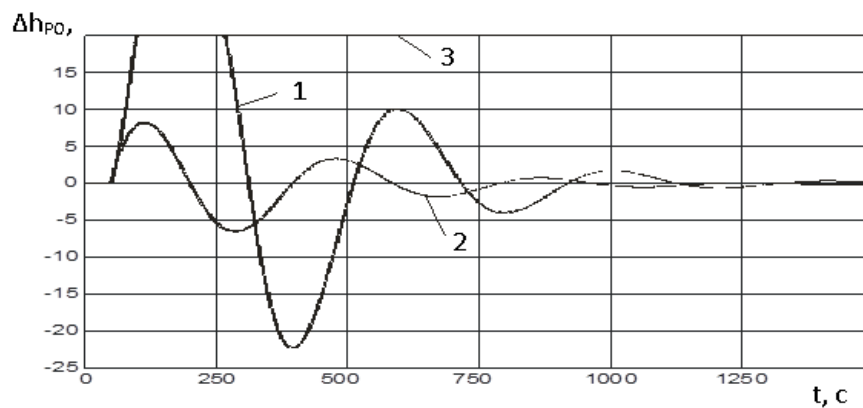


Рисунок 3.8 – Зміна положення РО барабанного котла в регулюючому режимі

Найкращі результати регулювання теплового навантаження забезпечує вдосконалена АСУ, в якій система управління компресором збільшує подачу штучного газу (рис. 3.9, крива 2), отримуючи сигнал завдання на зміну продуктивності $Z_p(t)$ від системи ідентифікації якісного складу кисневмісного вуглеводневого газу.

Така система повинна бути малоінерційною і мати високу точністю вимірювання складу штучного газу. Погіршення цих показників позбавить дану схему переваг, в порівнянні зі схемою управління компресором безпосередньо від регулятора витрати палива.

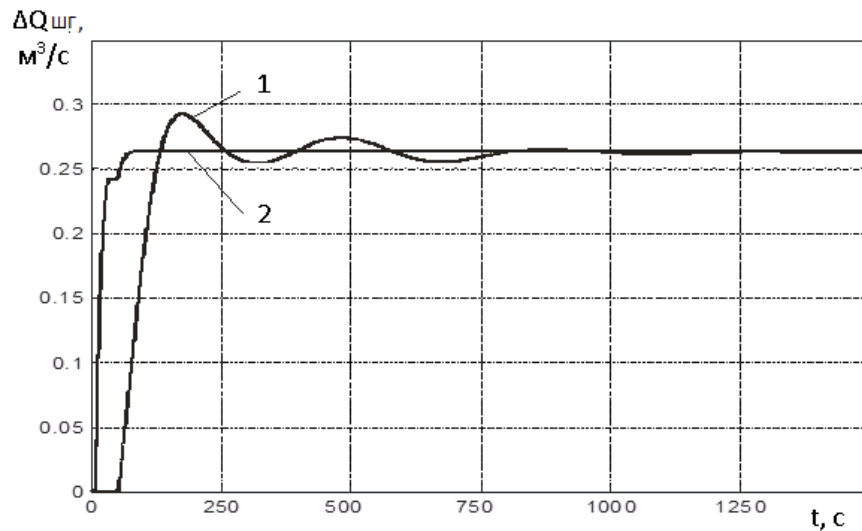


Рисунок 3.9 – Зміна витрати штучного газу до пальникових пристроїв

Таким чином, типова АСУ теплового навантаження, хоча і має менше динамічне відхилення параметра, що стабілізується, в порівнянні з АСУ з пристроєм зв'язку, не виконує поставлене завдання по утриманню роботи барабанних котлів із заданою продуктивністю. Система управління тепловим навантаженням з окремою системою управління компресором для підвищення тиску горючих штучних газів забезпечує в 3.5 разу менше динамічне відхилення витрати і тиску перегрітої пари і в 1.5 разу менший час регулювання, в порівнянні, коли компресор управляється системою регулювання витрати палива через ПЗ (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 Зведені показники якості регулювання теплового навантаження розглянутих АСУ

Вид АСУ	Максимальне динамічне відхилення, кПа (т/г)	Час перехідного процесу, с	Стала похибка, кПа (т/г)
Типова АСУ	22 (5.1)	∞	2.5 (0.5)
Удосконалена АСУ з ПЗ	23 (5.5)	1200	0

Удосконалена АСУ з системою управління компресором	6 (1.5)	800	0
--	---------	-----	---

Результатом дослідження третього розділу можна вважати удосконалення АСУ тепловим навантаженням та математичної моделі барабанного котла, яка враховує обмеження по пропускній здатності регулюючого органу та неконтрольовану зміну теплотворної здатності і густини горючих кисневмісних вуглеводневих газів, що дозволяє дослідити зміну характеристик парового котла в перехідних режимах [2; 3; 4; 7; 8; 9; 10].

3.4 Висновки до третього розділу

1. Проведені дослідження показали, що існує можливість використання низькокалорійного кисневмісного вуглеводневого газу в якості заміни природного газу на енергетичних і тепло-комунальних підприємствах України. Чисельні розрахунки показали, що за для подальшого використання такого палива без істотної модернізації енергетичного обладнання одним з основних обмежуючих факторів є пропускна здатність регулюючого органу.

2. Рішення проблеми досягається шляхом підвищення тиску газу в газопроводі за допомогою компресора. Введення в технологічну схему газового компресора призводить до необхідності модифікації типової АСУ теплового навантаження.

3. Застосування методики класичної теорії автоматичного управління дозволило визначити вид передатної функції пристрою зв'язку між регулятором палива та компресором для одного котла, і встановити функціональну залежність для регулятора тиску в газопроводі, коли група котлів працює на загальний паропровід

4. З огляду на виконані обчислювальні експерименти показано, що АСУ тепловим навантаженням з компресором, в порівнянні, коли компресор управляється системою регулювання витрати палива через ПЗ, для підвищення тиску горючих газів забезпечує в 3.5 разу менше динамічне відхилення витрати і тиску перегрітої пари і в 1.5 разу менший час регулювання.

РОЗДІЛ 4

СИНТЕЗ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НАВАНТАЖЕННЯМ ГРУПИ КОТЛІВ, ЯКІ ПРАЦЮЮТЬ НА ЗАГАЛЬНОГО СПОЖИВАЧА

Даний розділ присвячено розробці автоматизованої системи управління тепловим навантаженням групи барабанних котлів, які працюють на загальний паропровід. Така АСУ дозволяє компенсувати внутрішні збурення через склад і якість палива та зовнішні збурення через зміну теплового навантаження за рахунок вибору режиму роботи кожного з котлів, що враховує їх знос.

Для синтезу нової системи управління, яка зможе підтримувати задану потужність, необхідно вирішити наступні задачі. Визначити найкращий спосіб експлуатації котлів при спалюванні в них палива, яке значно відрізняється за складом від розрахункового. Розглянути математичну модель ділянки «витрата палива – витрата пари» для визначення динамічних властивостей об'єкта управління. Синтезувати автоматизовану систему управління потужністю групи котлів, які працюють на загального споживача та змоделювати роботу замкненої автоматизованої системи.

4.1 Обґрунтування зміни структури устаткування, що експлуатується при зміні складу палива

Як було показано в третьому розділі, при значних змінах характеристик палива, що йде на горіння, а саме зміні його густини і теплотворної здатності більш ніж на 20 %, існуюча система управління навантаженням котлів не забезпечує заданої якості пари, що подається споживачу.

Аналіз теплового і аеродинамічного розрахунків парового котла приводить до висновку, що зміна густини і теплотворної здатності палива

призводить до значних змін технологічних параметрів, які характеризують процеси перетворення енергії палива в теплову енергію. Для підтвердження цього висновку відповідно до нормативних методів були проведені розрахунки котла для палива різного складу. Метою розрахунку було визначення необхідної площі конвективної поверхні нагрівання для забезпечення заданої потужності котла.

Склад пального був прийнятий відповідно до [124]. Для порівняння ключові параметри були зведені в табл. 4.1. Для зручності теплотворної здатності пального віднесені до теплотворної здатності природного газу середнього складу. Таким чином, відносна теплотворна здатність пального менша за 1 для штучних (доменний, коксовий і т. п.) газів і більша за 1 для попутних газів. Також, в таблиці наведено відносну площу конвективних поверхонь $F / F_{розр}$, де $F_{розр}$ – площа для розрахункового складу палива (природного газу).

У таблиці використані наступні позначення:

Q_n^c – нижча теплота згоряння сухого газу, МДж/м³;

$Q / Q_{пре}$ – теплота згоряння пального, віднесена до природного газу;

V_T – витрата пального, м³/с;

V_0 – відносний об'єм повітря, необхідний для спалювання 1 м³ пального, м³/м³;

w – швидкість повітряно-паливної суміші в гирлі пальника, м/с;

$V_{дз}$ – відносний об'єм димових газів, що утворюються при спалюванні 1 м³ палива, м³/м³;

$G_{дз}$ – витрата димових газів, м³/с;

t_T / t_K – температура димових газів на виході з топки і в конвективній частині, °С;

α_K – коефіцієнт тепловіддачі в конвективній частині, Вт/(м²·К);

$F / F_{розр}$ – відносна площа конвективної частини м²/м².

Таблиця 4.1 – Порівняльні характеристики розрахунку котла

	Q_u^c , МДж/ м ³	$Q/Q_{прг}$	B_T , м ³ / с	V_0 , м ³ / м ³	w , м/с	$V_{оз}$, м ³ /м ³	$G_{оз}$, м ³ /с	t_T/t_K , °С	α_K , Вт/(м ² К)	$F/F_{розр}$, м ² /м ²
Доменний газ	4,06	0,11	15,78	0,78	61,03	1,67	48,1	700/419	79	3,00
Штучний газ 3	10,34	0,28	6,19	2,30	50,59	3,11	66,0	450/287	97	3,00
Водень	10,78	0,29	5,94	2,36	99,37	3,04	63,3	475/294	95	5,50
Штучний газ 2	13,28	0,35	4,82	2,90	41,42	3,65	71,4	350/227	102	2,00
Коксовий газ	17,69	0,47	3,62	4,26	42,06	5,20	103,1	430/264	130	2,00
Штучний газ 1	21,28	0,57	3,01	5,16	62,31	6,26	121,1	1060/327	144	1,00
Біогаз	20,86	0,56	3,09	5,57	5052	6,91	146,4	640/374	163	2,00
Природний газ	37,56	1,00	1,70	9,96	41,50	11,67	228,0	1368/767	218	1,00
Попутний газ 1	38,12	1,01	1,68	10,11	41,46	11,83	231,3	980/466	220	1,00
Попутний газ 2	42,36	1,13	1,51	11,13	40,75	13,14	252,6	990/471	233	1,00
Попутний газ 3	42,89	1,14	1,49	11,28	40,75	13,27	255,1	980/466	234	1,00
Попутний газ 4	46,99	1,25	1,36	12,40	40,60	14,43	276,3	990/460	247	1,00
Попутний газ 5	47,42	1,26	1,35	12,46	40,41	14,62	278,5	980/463	248	1,00

Побудовано відповідність відносної площі поверхні нагрівання від приведеної теплотворної здатності пального (рис. 4.1).

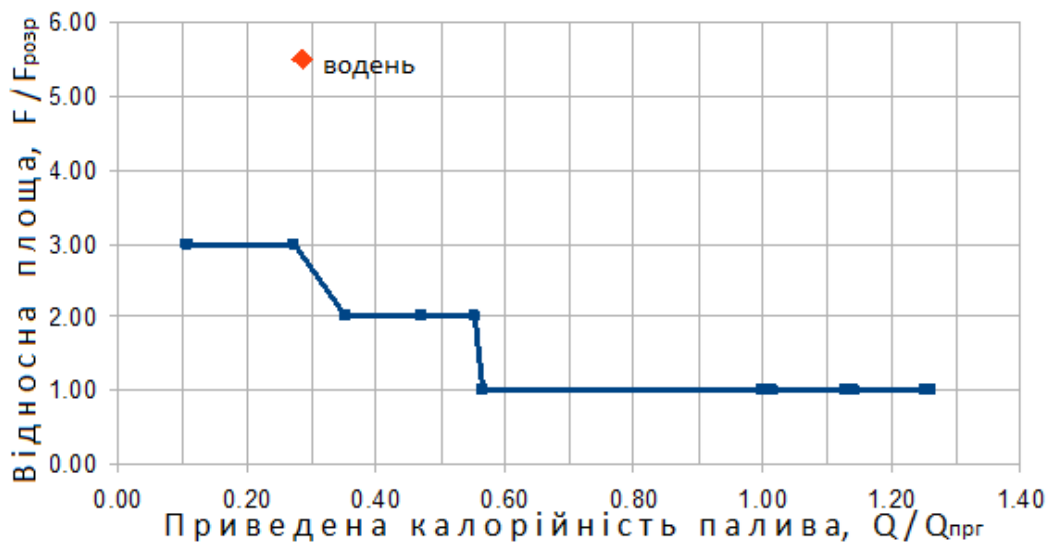


Рисунок 4.1 – Відповідність відносної площі конвективної частини котла від приведеної теплотворної здатності пального

Аналіз приведених даних свідчить наступне: чим нижча приведена теплотворна здатність пального, тим необхідніше збільшення поверхонь теплообміну між димовими газами і водяною парою. Причому, тільки за рахунок збільшення витрати палива, і без збільшення площі поверхні теплообміну, неможливо домогтися збереження потужності, що виробляється. Це пояснюється, як зменшенням температури горіння димових газів, так і зменшенням їх витрат.

Як граничний випадок, у якості пального розглянуто водневомісний газ. При використанні в якості палива чистого водню з теплотворною здатністю $Q_{CH} = 10,8$ МДж/м³ замість природного газу з теплотворною здатністю $Q_{CH} = 37,6$ МДж/м³ витрата палива збільшується природно, майже в три рази. Однак, кількість повітря, що подається на горіння повинно бути в майже п'ять разів менше (2,38 м³/м³ замість 9,96 м³/м³). Тому кількість димових газів зменшується. Також, значно менше стає теплоємність димових газів: 0,27 кДж/(кг·К) замість 2,61 кДж/(кг·К). А це, в свою чергу, призводить до того, що температура димових газів на виході з топки менша розрахункового значення в 3 рази (475 °С замість +1390 °С). Таким чином можна зробити проміжний висновок, що при незмінній конструкції котел не здатний виробити задану потужність навіть за умови збільшення витрати палива. Крім того, збільшення витрати палива призводить до збільшення швидкості витікання газів з пальника. Таке збільшення, при перевищенні допустимих значень швидкості, може привести до відриву факела і вибуху паливно-повітряної суміші всередині котла [60].

Внаслідок вищенаведеного, можна зробити висновок, що для підтримки заданого навантаження при зниженні теплотворної здатності пального, простого збільшення витрати палива може виявитися недостатньо. По-перше, виникають обмеження, пов'язані з пропускною здатністю регулюючих клапанів і пальників. Навіть застосування компресора буде обмежуватися швидкістю витікання газу через пальник. По-друге, зміна складу пального

призводить до значних відхилень температур і швидкостей димових газів по довжині газового тракту. Виходом з даної ситуації може служити зміна площі поверхні теплообміну. Цього можна досягти шляхом включення в роботу або виключення з роботи котельного обладнання.

Природно, що при змінній роботі прискорюється знос обладнання. Тому, при прийнятті рішення по управляючим впливам слід враховувати ступінь зносу котельного обладнання.

Таким чином, виникає задача синтезувати автоматизовану систему управління тепловим навантаженням групи барабанних котлів, що працюють на загальний паропровід, яка дозволяє компенсувати внутрішні збурення через склад і якість палива та зовнішні збурення зміною теплового навантаження за рахунок вибору режиму роботи кожного з котлів, враховуючи їх знос.

4.2 Математична модель об'єкта автоматизації

В розглянутій технологічній ділянці «витрата палива – витрата пари» барабанного котла можна виділити наступні структурні елементи: компресор і газопровід вуглеводневого кисневмісного газу (в подальшому штучний газ), регулюючий орган, через який проходить пальне топкова камера з екранними поверхнями нагріву, барабан котла і паропровід. Регульованими параметрами для цієї ділянки є тиск перегрітої пари P_{III} і тепловиділення в котельній камері Q_T . Управляючим впливом є положення РО по витраті газоподібного палива h_{PO} або число обертів приводу компресора n . Впливами, що збурюють – теплотворна здатність пального (внутрішнє збурення) і теплове навантаження споживача пари (зовнішнє збурення). Для управління технологічною ділянкою використовується двоконтурна схема регулювання зі стабілізуючим

регулятором витрати палива і коригуючим регулятором тиску перегрітої пари (див. розділ 3 рис. 3.1).

Грунтуючись на роботах [110, 125] і з урахуванням особливостей обраної схеми регулювання, можна записати систему лінійних диференціальних рівнянь у відхиленнях для регульованої ділянки. Рівняння для газового компресора і ділянки газопроводу від нього до топкової камери:

$$T_{III} \frac{dQ_{III}}{dt} + \Delta Q_{III} = T_K \frac{dn}{dt} + k_K \Delta n, \quad (4.1)$$

де T_{III} – інерційність газопроводу, k_K – коефіцієнт передачі між числом оборотів n і об'ємною витратою штучного газу Q_{III} .

Рівняння тепловиділення в котельній камері для природного та штучного газу:

$$Q_F = Q_T^{III} k_{PO} \Delta h_{PO} + Q_T^{III} \Delta Q_{III} + Q_{III} \Delta Q_T^{III}. \quad (4.2)$$

Рівняння передачі тепла в котельній камері до пароводяної суміші в екранних поверхнях нагріву:

$$T_T \frac{dQ_T}{dt} + \Delta Q_T = k_F \Delta Q_F, \quad (4.3)$$

де T_T – інерційність процесу теплопередачі, що враховує ефект акумуляції тепла в металевих конструкціях барабана котла, k_F – коефіцієнт передачі тепла між газоповітряною сумішшю, що спалюється, і пароводяної сумішшю, яка сприймає тепло через поверхню теплообміну.

Рівняння залежності тиску пари в барабані котла P_b від кількості тепла, отриманого пароводяної сумішшю, і витратою пари споживачем D_{III} :

$$T_B \frac{dP_b}{dt} + \Delta P_b = k_T \Delta Q_T + k_D \Delta D_{III}, \quad (4.4)$$

де T_B – інерційність процесу генерації пари в барабані котла, k_T , k_D – коефіцієнти передачі між сприйняттям тепла і тепловим навантаженням, відповідно.

Модель паропроводу від барабану котла до споживача описується рівняннями:

$$T_{III} \frac{dP_{III}}{dt} + \Delta P_{III} = k_{III} \Delta P_b ; \quad (4.5)$$

$$T_{III} \frac{dD_{III}}{dt} + \Delta D_{III} = k_{III} \Delta P_b , \quad (4.6)$$

де T_{III} – інерційність паропроводу, k_{III} – коефіцієнти передачі між зміною тиску в барабані котла і витратою перегрітої пари, k_{III} – коефіцієнти передачі між зміною тиску в загальному паропроводі і витратою перегрітої пари.

Збурення зміною теплотворної здатності пального усувається в типовій АСУ регулятором палива, який використовують в зворотному від'ємному зв'язку сигналу по теплоті $\Delta Q_r^{3M} = C_{II} \frac{dP_b}{dt} + \Delta D_{III}$, де C_{II} – постійний коефіцієнт, що характеризує масову здатність пароводяної суміші акумулювати і металу випарної частини котла [112].

Як було зазначено в розділі 3 АСУ теплового навантаження барабанного котла повинна забезпечити плавний перехід на подачу штучного газу за допомогою компресора, коли регулятор палива максимально відкриває регулюючий орган.

Представлена передатна функція (3.18) пристрою зв'язку являє собою пропорційну ланку, враховуючи обмеження у вигляді теплотворної здатності природного і штучного газів, які накладають умову використання такої АСУ, яка полягає в виборі одного виду пального [29].

4.3 Алгоритм визначення умовної формули і ентальпії палива змінного складу в процесі його спалювання

Модель, яка використовується для визначення складу і температури продуктів згорання кисневмісного пального в повітрі, замкнута з розрахунку визначення 14 невідомих: 12 парціальних тисків P_i (мольних концентрацій)

продуктів згоряння; кількості молей палива M_T , при якому парціальні тиски продуктів згоряння кількісно дорівнюють їх мольним концентраціям; температури продуктів згоряння. Явно записано 13 рівнянь (2.30 – 2.42). Ще, в якості одного виступає умова рівності ентальпій палива і продуктів згоряння, виходячи з виконання якого визначається момент закінчення ітераційного процесу розрахунку.

В ролі вихідних даних виступають: перелік хімічних елементів, з яких складається умовна формула пального (для кисневмісного вуглеводневого палива ними є C , H і O); кількість атомів цих елементів, що становлять умовну формулу пального (в даному випадку це b_C , b_H , b_O (2.1)); мольний стехіометричний коефіцієнт співвідношення компонентів χ_0^w і коефіцієнт надлишку окиснювача α . Останні дві величини використовуються для визначення необхідного в розрахунках мольного коефіцієнта співвідношення компонентів $\chi^w = \alpha \cdot \chi_0^w$ (2.8).

Математична модель пов'язує вихідні дані і невідомі величини, що визначаються. Конкретна модель замикається для певної кількості невідомих. Але, в загальному випадку, вона не вимагає використання конкретних величин в якості невідомих. Всі величини в рамках однієї моделі можуть мінятися ролями. Так, якщо температуру продуктів згоряння не розраховувати як невідому величину, а вимірювати в процесі горіння і використовувати її в якості одного з вихідних даних, модель (2.30 – 2.42) може бути застосована для визначення будь-якої іншої величини. В її якості може виступати, наприклад, кількість атомів будь-якого хімічного елемента в умовній формулі пального. Скористаємося цією можливістю для побудови моделі визначення складу і ентальпії кисневмісного вуглеводневого палива в процесі його спалювання.

Для вирішення поставленого завдання введемо два допущення:

1. Пальне, що використовується, знаходиться тільки в газоподібному стані.

2. Перелік хімічних елементів, що входять до складу умовної формули пального, відомий. Їх кількісний склад підлягає визначенню.

Прийняті припущення не є жорсткими. По першому з них можна сказати наступне. Більшість придатних до застосування несертифікованих видів пального знаходиться в газоподібному стані. До них відносяться, наприклад, гази бродіння в метантенках, гази, що утворюються в процесах повільного піролізу органічних речовин (відходів), газифікації низькоякісного вугілля, їх газової конверсії, доменні гази, гази коксохімічного, нафтопереробного виробництв, гази звалищ, продукти дегазації шахт і т. д. Друге припущення, також, не вносить істотного обмеження. Всього 4 хімічні елементи (C , H , O , N) лежать в основі переважної кількості органічних речовин, що входять до суміші горючих газів. Вони ж, в основному, визначають енергетичну складову цих сумішей. Внесення в цей список ще двох елементів (S , P) дозволяє розглядати склад переважної більшості органічних речовин, що представляють інтерес в якості пального. Для прикладу, при застосуванні для визначення складу суміші речовин вважається кращим, на поточний момент, метод газової хроматографії: необхідно знати перелік всіх речовин, що визначаються. При визначенні складу природного газу, [128] ця кількість може досягати декількох десятків. Кількість же складових їх елементів не перевищує 6. Їх перелік може бути визначений з аналізу вихідної сировини.

Визначення складу відбувається шляхом розрахунку кількості атомів хімічних елементів, що входять в умовну формулу палива. В якості вихідних даних використовуються величини витрат пального, окиснювача і температури, яка отримується в процесі їх спалювання. В якості основної частини (ядра) моделі використовуються рівняння, подібні до (2.30–2.42). Розрахунок повинен виконуватися виходячи з забезпечення ізоентальпійності процесу. Тому, необхідні вимірювання повинні проводитися при горінні в спеціальному пристрої, на яке отримано патент [14].

У спеціальному пристрої умови навколишнього середовища близькі до нормальних. У цьому випадку властивості реальних газів близькі до

властивостей ідеальних, і молярні об'єми для всіх газів рівні. На підставі цього [32], відношення об'ємних витрат будь-яких газів можна вважати рівним відношенню їх мольних витрат.

$$\chi^w = \frac{\dot{V}^{OK}}{\dot{V}^{\Gamma}} \quad (4.7)$$

Запишемо умовну формулу палива (2.9) з використанням узагальненої форми (2.1) і виразу (2.51) для мольного співвідношення компонентів:

$$C_{b_c} H_{b_H} O_{\left(b_o + \frac{\dot{V}^{OK}}{\dot{V}^{\Gamma}} \cdot 0.419\right)} N_{(\chi^w \cdot 1.518)}. \quad (4.8)$$

Далі модель для визначення умовної формули і ентальпії палива змінного складу в процесі його спалювання будується у відповідності до наступного алгоритму:

1. На першому етапі горючий газ, склад якого визначається, і повітря подаються в пристрій для спалювання з деякими об'ємними витратами. Величини цих витрат заміряються (\dot{V}_1^{OK} та \dot{V}_1^{Γ}) і використовуються як частина вихідних даних при складанні моделі.

2. Температура продуктів в камері згоряння безперервно вимірюється. Після встановлення, її величина фіксується і використовується як частина вихідних даних при складанні моделі. На першому кроці це величина T_1 . На наступних – T_i , в залежності від номера кроку алгоритму.

3. Спираючись на отримані шляхом вимірювання величини \dot{V}_1^{OK} , \dot{V}_1^{Γ} , і T_i , використовуючи рівняння виду (2.30 – 2.42), записується відповідна за номером частина моделі для визначення однієї величини зі списку b_c , b_H , b_o , $I^{(T)}$.

4. Якщо записані всі частини моделі, число яких дорівнює кількості невідомих, що визначаються, процес завершено (STOP). Для кисневмісних вуглеводнів кількість обумовлених невідомих дорівнює 4 (b_c , b_H , b_o , $I^{(T)}$). Якщо процес не завершений, починається наступний крок.

5. При зміні об'ємної витрати одного з компонентів, наприклад, окиснювача (повітря) заново вимірюються нові витрати (\dot{V}_i^{OK} та \dot{V}_i^F) при поточному процесі спалювання, та відбувається перехід до пункту 2 алгоритму.

Рішення, отримане на основі розробленої моделі, має особливість. У процесі рішення визначається не перелік газів, що входять в суміш пального, а його умовна формула і ентальпія. Цього достатньо для організації оптимального процесу спалювання газоподібного несертифікованого пального змінного складу.

Як зазначено при описі процесу складання моделі вірне рішення може бути отримано тільки при **незмінності** хімічного складу пального та окиснювача в процесі їх спалювання. Для виключення помилки розрахунку в разі недотримання такої умови можливий наступний підхід. Після виконання поточного розрахунку на основі 4-х замірів, виконується наступний замір, припустимо 5-й. Виключаються результати 1-го виміру і на основі 2-го –5-го вимірів виконується поточний перерахунок моделі. Його результати порівнюються з попереднім варіантом розрахунку. Якщо вони збігаються, робиться висновок про незмінність протягом аналізованого часу хімічного складу. Далі виконується наступний обсяг вимірів і розрахунків. Що стосується розбіжності при черговому порівнянні результатів розрахунків, відзначається зміна хімічного складу пального. Процес триває безперервно.

Для ілюстрації алгоритму визначення оптимального відношення пального/повітря при спалюванні вуглеводневого кисневмісного газу, склад якого довільно змінюється в часі, необхідно підготувати дані. Ілюстрацію здійснимо на прикладі випадкової зміни в часі складу газу, який знаходиться в газовій магістралі і надходить на спалювання в промисловий барабанний котел. Припустимо, що в газовій магістралі випадковим чином може перебувати суміш метану, вуглекислого газу, водню і етилового спирту в різних співвідношеннях. На основі моделі прямої задачі, викладеної у другому розділі, були розраховані максимальна температура T , парціальні тиски P_{CO} і

P_{NO} при спалюванні одного моля пального в повітрі в залежності від χ – мольного коефіцієнта співвідношення компонентів і як наслідок коефіцієнт надлишку повітря α . У табл. 4.2 наведено зазначені дані для визначеної суміші газів при атмосферному тиску. Крім того, для кожного газу наведено молярний стехіометричний коефіцієнт співвідношення компонентів, який відповідає $\alpha=1$.

Таблиця 4.2 – Результати моделювання горіння суміші метану, вуглекислого газу, водню і етилового спирту при різних співвідношеннях в повітрі

№ складу	1		2		3	
Вміст компонентів	CH ₄ = 55% CO ₂ = 45%		CH ₄ = 72% CO ₂ = 25% H ₂ = 3%		CH ₄ = 100%	
Мольний стехіометричний коефіцієнт (молей повітря на 1 моль пального)	$\chi_0=5.24$		$\chi_0=6.93$		$\chi_0=7.02$	
α	T ₁	χ	T ₂	χ	T ₃	χ
0.5	1260	2.620	1385	3.465	1532	4.78
0.6	1493	3.144	1620	4.158	1761	5.73
0.7	1683	3.668	1808	4.851	1940	6.69
0.8	1842	4.192	1962	5.544	2084	7.64
0.9	1976	4.716	2088	6.237	2197	8.6
1.0	2054	5.240	2147	6.93	2230	9.55
1.1	1973	5.764	2063	7.623	2143	10.5
1.2	1882	6.288	1965	8.316	2040	11.5
1.3	1797	6.812	1874	9.009	1943	12.4
1.4	1722	7.336	1791	9.702	1855	13.4
1.5	1653	7.860	1716	10.395	1775	14.3
1.6	1591	8.384	1649	11.088	1703	15.3
1.7	1532	8.908	1587	11.781	1637	16.2
1.8	1483	9.432	1531	12.474	1578	17.2
1.9	1435	9.956	1480	13.167	1523	18.1
2.0	1391	10.480	1433	13.86	1473	19.1

На основі отриманих табличних даних побудовані залежності температури горіння моля пального кожного з розглянутих газів від кількості молей повітря, які надходять для його окислення (рис. 4.2). У кожній залежності однозначно ідентифікується максимум температури полум'я, що

повністю відповідає теоретичним і практичним результатам. Максимум температури відповідає відповідному мольному стехіометричному коефіцієнту співвідношення компонентів χ_0 або коефіцієнту надлишку повітря $\alpha = 1$. Зменшення практично до нуля парціального тиску CO при збільшенні коефіцієнта надлишку повітря відповідає дійсності. Так само адекватно обчислено наявність максимуму парціального тиску NO. Зменшення кількості утворення NO пов'язано зі зменшенням температури горіння [40].

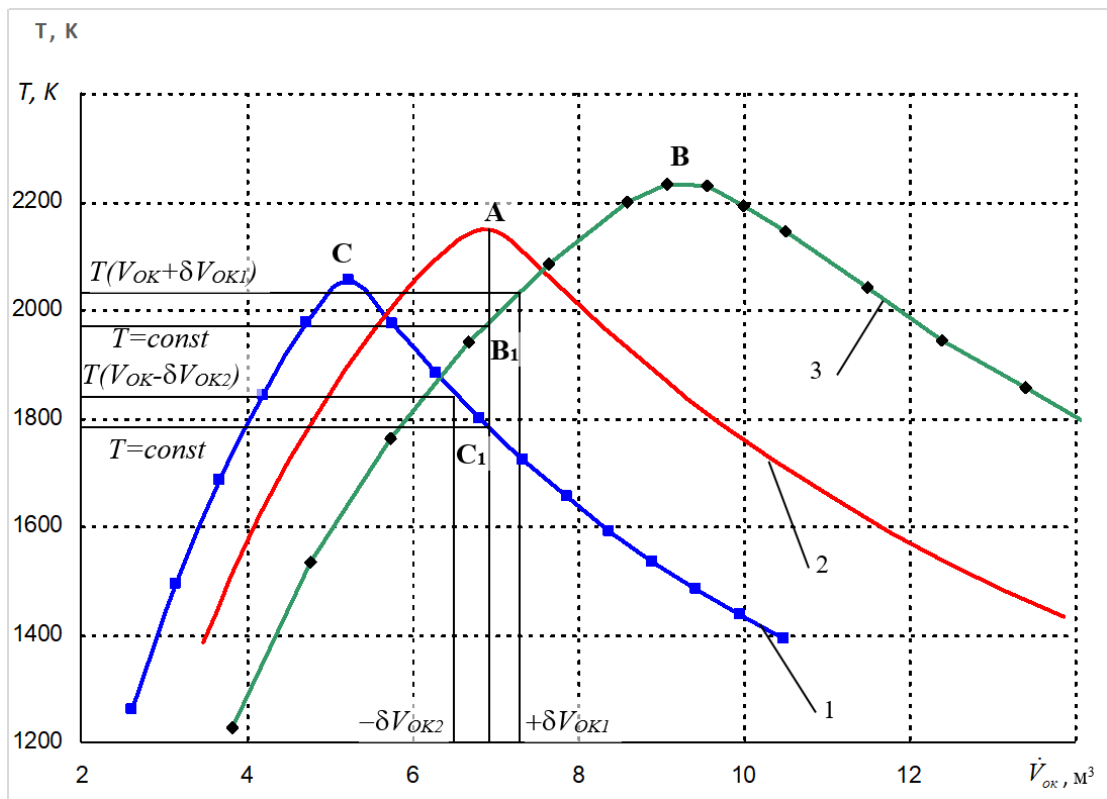


Рисунок 4.2 – Залежність зміни температури горіння T суміші газів від мольного стехіометричного коефіцієнта \dot{V}_{OK}

Позначимо через \dot{V}_{OK} , $\dot{V}_Г$ – об'ємні витрати окиснювача (повітря) і горючих газів, відповідно. Для реалізації запропонованого алгоритму необхідно наступне технічне забезпечення. Необхідна можливість вимірювань температури горіння газів, об'ємних витрат повітря і горючих газів. Крім того,

необхідна можливість зміни витрат повітря і горючих газів, які надходять в котел.

Алгоритм визначення оптимального відношення пального/повітря при спалюванні вуглеводневого газу, склад якого довільно змінюється в часі, наступний.

Крок 1. На інтервалі часу $\Delta\tau$ вимірюється температура T і осереднюється її значення. На рис. 4.2 графічна ілюстрація цього виміру показана лінією $T = const$.

Вимірювання температури здійснюється за фіксованих поточних i -х значеннях $\dot{V}_{окi}$ і $\dot{V}_{Гi}$.

Крок 2. При фіксованому значенні $\dot{V}_{Гi}$ відбувається зміна $\dot{V}_{окi}$ на величину $\delta\dot{V}_{ок}$. Вимірюється нове значення температури $T(\dot{V}_{окi} + \delta\dot{V}_{ок})$ і визначається характер монотонності на розглянутому інтервалі зміни об'ємної витрати повітря. Якщо $T(\dot{V}_{окi}) > T(\dot{V}_{окi} + \delta\dot{V}_{ок})$, то температура T зменшується на цьому інтервалі, і, в разі $T(\dot{V}_{окi}) < T(\dot{V}_{окi} + \delta\dot{V}_{ок})$, вона збільшується (рис 4.2).

Крок 2 здійснюється до тих пір, поки подальша $i+1$ зміна $\delta\dot{V}_{ок}$ не призведе до зміни характеру монотонності на протилежний.

Крок 3. Змінюється знак прирощення $\delta\dot{V}_{ок}$ на протилежний і здійснюється перехід на крок 1.

В такому пошуковому режимі в нескінченному тимчасовому циклі розглянутий алгоритм визначає область поточного екстремуму. Якісна зміна складу газу в процесі горіння призводить до пошуку області нового екстремуму. По-перше, принципово нова околиця екстремуму значення температури T може знаходитися як вище, так і нижче поточної зони i , по-друге, за значенням об'ємної витрати повітря, як зліва, так і праворуч від неї.

Розглянемо на прикладі спалювання трьох сумішей газів, що має в своєму складі метан концентрацією 55 %, 72 % і 100 %, зміна області

екстремуму, отримана за запропонованим алгоритмом (рис. 4.2). Припустимо, що вказаний пошуковий алгоритм привів до околиці точки А кривої (2) і відомі поточні $T(\dot{V}_{окi})$ і $\dot{V}_{окi}$. Припустимо, стрибкоподібно відбулася зміна якісного складу пального: на склад 1 (крива (1)) або метан (крива (3)). У такому випадку при незмінному $\dot{V}_{окi}$ відбудеться зміна температури T на тимчасовому інтервалі $\Delta\tau$. Якщо якісний склад буде відповідати метану, то поточне значення температури (крок 1) буде знаходитися в околиці точки B_1 на зростаючій частині кривої (3). Якщо якісний склад буде відповідати складу 1, то поточне значення температури (крок 1) буде знаходитися в околиці точки C_1 на спадаючій частині кривої (1). Не залежно від точки здійснюється приріст $\delta\dot{V}_{ок}$ і визначається характер монотонності поточної кривої. Виконуючи крок 2 запропонованого алгоритму визначається нова околиця екстремуму: точка С – для складу 1, крива (1), точка В – для метану, крива (3) [123; 33].

4.4 Розробка алгоритму пошуку найкращого способу розподілу навантаження між котлами

Аналіз літературних джерел, проведений в 1.3, приводить до висновку, що розподіл навантаження між котлами, які працюють на загального споживача, можна реалізувати за рахунок класичного методу розподілу за найменшим відносним приростом витрати палива [113]. Даний метод застосовують на багатьох енергогенеруючих підприємствах (котельнях, ТЕЦ, ТЕС), а модифікований метод реалізований в сучасних АСУ ТП.

Питання пошуку найкращого розподілу навантаження між енергоустановками розглядається повсякчас в залежності від критеріїв, які висуваються до нього, відповідно до стану економічних стосунків. На

теперішній час, коли обладнання АСУ ТП може вирішувати не тільки задачі керування, а й задачі визначення стану обладнання, з'являються роботи, які дозволяють підвищити якість рішень з автоматизованого управління енергетичними технологіями. До таких робіт можна віднести [114; 115; 116].

У статті [114] описується програмно-технічний комплекс, що дозволяє розподілити теплове та електричне навантаження між енергоблоками електростанції. Критерієм найкращого розподілу навантаження між енергоблоками є мінімум витрат палива по електростанції в цілому. Програмно-технічний комплекс реалізовано на базі сучасних обчислювальних засобів і SCADA системи. Безсумнівною перевагою результатів цієї роботи є зменшення психофізичного навантаження на операторів при зміні режимів роботи основного обладнання, так як визначення необхідного рівня навантаження кожного з агрегатів покладено на ЕОМ.

В роботі [115] наводиться метод керування енергоблоком, який застосовуючи чисельне інтегрування визначає погодинні витрати палива на основі вхідних даних відносних приростів витрат палива. В якості критерію найкращого розподілу навантаження зазначено рівність відносних приростів витрати палива для котлів, що працюють на різних рівнях потужності. Ця задача вирішується за допомогою пакета Matlab.

Робота [116] присвячена розгляду основних проблем і функціональних можливостей реалізації алгоритмів оптимального управління технологічними та виробничими процесами блочного і станційного рівнів. Також, в цій роботі відзначено, що з точки зору управління економічністю технологічного процесу мінімізація відносного приросту витрати палива $b(t)$ є некоректною. Поточна витрата палива $B(t)$ визначається інерційністю процесу «котел – турбіна – генератор» і обумовлена не в поточній потужності $N(t)$, а роботою, яка була отримана на інтервалі часу τ_3 , а не потужністю $N(t + \tau_3)$, де τ_3 – запізнювання технологічного процесу. Застосування цього критерію є правомірним тільки для стаціонарних режимів роботи обладнання без будь-

яких зовнішніх і внутрішніх збурень. У перехідних і нестационарних режимах питома витрата палива довільна і не відображає поточну економічність роботи обладнання. В разі підвищення потужності потрібно витратити паливо на додатковий розігрів обладнання. В разі зменшення потужності акумульована енергія в обладнанні буде витрачатися як витрата палива.

Треба відзначити, що питанням розподілу навантаження з урахуванням надійності і екологічної обстановки приділялася увага і раніше [40, 126].

Останнім часом, крім врахування витрат основних енергетичних потоків для підвищення ефективності, враховується знос обладнання. Так як в країнах колишнього СРСР більшість енергогенеруючих підприємств було введено в експлуатацію в 1950–1970 роки, фактор надійності набуває все більшого значення. В останній час почали з'являтися роботи, в яких обґрунтовується необхідність врахування надійності обладнання іншими словами, мова йде про керування ресурсом обладнання. Наприклад, в [97] обґрунтовується введення комплексного критерію оцінки роботи ТЕС. Серед складових такого критерію пропонується враховувати штрафи за викиди, які погіршують екологічну обстановку. Зміна складу палива та особливості компонування обладнання електростанції впливають на надійність її експлуатації.

Таким чином, на підставі вищесказаного, можна зробити висновок, що питання оперативного управління найкращим розподілом навантаження між паралельно працюючими котлами з урахуванням їх надійності до кінця не вирішене.

В подальшому, в роботі для визначення найкращого навантаження кожного котла пропонується використовувати критерій, що враховує як його ККД, так і величину зносу.

В роботі [129] вже було вирішено схожу задачу. Однак, запропоновані в зазначеній роботі величини, що входять в критерій ефективності, мають значення в діапазоні від $4,1e^{-312}$ до $4,4e^{-312}$. Такі значення є нескінченно малими для застосування їх в технічних системах.

Для того, щоб уникнути вищесказаного недоліка, в даній роботі пропонується використовувати нормовані значення ККД котла і коефіцієнт зносу обладнання.

Знос обладнання можна визначити коефіцієнтом зносу по аналогії з розрахунком величини амортизаційних відрахувань [130]:

$$k_{\text{зн}} = 1 - \frac{\sum \frac{N_i}{N_{\text{max}}} T_i}{T_{\text{експ}}} = 1 - \frac{1}{T_{\text{експ}}} \int_0^{T_{\text{експ}}} \frac{N(t)}{N_{\text{max}}} dt, \quad (4.9)$$

де N_{max} – максимальне навантаження (потужність) котла;

N_i – часткове навантаження (потужність) котла;

$T_{\text{експ}}$ – плановий час експлуатації котла;

T_i – тривалість часу роботи котла на частковому навантаженні.

Введемо позначення:

$$\frac{N_i}{N_{\text{max}}} = \nu_i \text{ – відносна потужність котла;}$$

$$\frac{T_i}{T_{\text{експ}}} = \tau_i \text{ – відносний час роботи котла на частковому навантаженні.}$$

Тоді, коефіцієнт зносу можна записати в наступному вигляді:

$$k_{\text{зн}} = 1 - \sum \nu_i \tau_i = 1 - \frac{1}{T_{\text{експ}}} \int_0^{T_{\text{експ}}} \nu(t) \tau(t) dt. \quad (4.10)$$

Для поточного моменту експлуатації (4.10) можна записати

$$k_{\text{зн}}(\nu) = 1 - \nu \tau. \quad (4.11)$$

Тобто, для поточного моменту часу, коефіцієнт зносу є функцією потужності.

Залежність ККД котла від його навантаження може бути описана квадратичною залежністю [124]

$$\eta(N) = c_1 (N - N_{\text{max}})^2 + c_2, \quad (4.12)$$

де c_1 і c_2 – константи.

Визначимо значення c_1 і c_2 з умов: $\eta(N_{\max}) = \eta_0$, тобто при максимальному навантаженні ККД дорівнює максимальному (розрахунковому) значенню; $\eta(0) = 0$, тобто при нульовому навантаженні ККД дорівнює нулю.

Склавши і вирішивши систему рівнянь, отримаємо значення коефіцієнтів:

$$c_1 = \frac{\eta_0}{N_{\max}^2}; \quad c_2 = \eta_0.$$

Тоді (4.12) можна переписати у вигляді:

$$\eta(N) = \frac{\eta_0}{N_{\max}^2} (N - N_{\max})^2 + \eta_0, \quad (4.13)$$

або

$$\eta(v) = \eta_0 (2v - v^2). \quad (4.14)$$

Пропонується в якості критерію управління роботою групи котлів використовувати вираз:

$$I(\eta, k_{zn}) = \sum_{j=1}^n (a_{1j} \eta(v_j) - a_{2j} k_{zn}(v_j)), \quad (4.15)$$

де n – кількість котлів, a_{1j} , a_{2j} – вагові коефіцієнти для j -го котла.

Перевага використання виразу (4.15) у порівнянні з іншими [110; 115; 124; 125] полягає в наступному:

– величини $\eta(v)$ і $k_{zn}(v)$ одного порядку і їх значення змінюються в діапазоні від 0 до 1;

– функція $I(\eta, k_{zn})$ має локальний і глобальний екстремуми, які співпадають.

При цьому, значення максимуму пропорційне до величини зносу. На рис. 4.3 представлені графіки, які демонструють залежності $\eta(v)$, $k_{zn}(v)$ і $I(\eta, k_{zn})$.

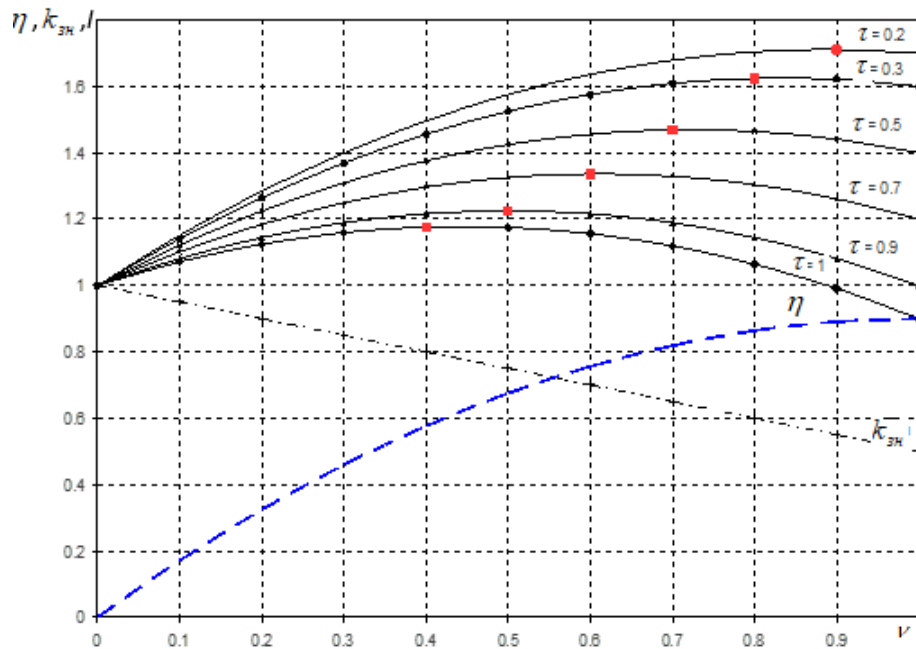


Рисунок 4.3 – Залежність $\eta(\nu)$, $k_{зн}(\nu)$ і $I(\eta, k_{зн})$ від відносного навантаження ν .

Чирвоними точками вказані максимальні значення критерію. Графіки, наведені на рисунку, побудовані при використанні наступних припущень: $\eta_0 = 0.9$, $k_{зн}(\nu) = 1 - 0.5\nu$, $\tau = 0.5$; графіки зміни критерію побудовані для коефіцієнтів зносу $k_{зн}$ при $\tau = \{0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1\}$.

Рішення задачі раціонального розподілу навантаження між працюючими котлами зводиться до пошуку максимального значення функції (4.15).

Введемо наступні обмеження і допущення:

- обладнання (котли) є працюючим, тому рішення задачі оптимізації має проводитися в режимі реального масштабу часу;
- так як пошук найкращого розподілу навантаження проводиться для реального обладнання, функціональна залежність ККД від потужності не задана, а ККД розраховується в режимі реального часу по виміряним значенням технологічних параметрів;
- значення ККД може змінюватися внаслідок зміни складу палива;
- варійованими змінними є задані значення потужності кожного котла ν_j ;

– значення змінної може перебувати в діапазоні

$$0 \leq v_j \leq 1; \quad (4.16)$$

– сума потужностей всіх котлів повинна дорівнювати заданому значенню сумарної потужності:

$$\sum_{j=1}^n v_j = N_z; \quad (4.17)$$

Для реалізації процедури пошуку пропонується використовувати модифікований симплекс метод Нелдера-Міда, тому що він не вимагає знаходження похідної функції, що мінімізується. Незважаючи на те, що вказаний метод пошуку є безумовним, обмеження (4.16) легко реалізуються програмно. А саме, при виході варійованої змінної за задані межі, їй примусово присвоюється граничне значення.

Вираз (4.9) дозволяє зменшити розмірність розв'язуваної задачі на одиницю. Тобто, замість пошуку мінімуму функції $I(\eta, k_{zn})$ від n змінних знаходити мінімум функції I_1 від $n-1$ змінної, а після, відновити (обчислити) значення вхідних змінних.

Розглянемо рішення задачі найкращого розподілу навантаження для роботи трьох котлів з відносними навантаженнями v_1, v_2, v_3 .

Якщо представити розподіл навантаження у вигляді фазового простору з координатами, (рис. 4.4), то вираз (4.17) є рівнянням площини, в межах якої буде проводитися пошук екстремуму функції (4.15).

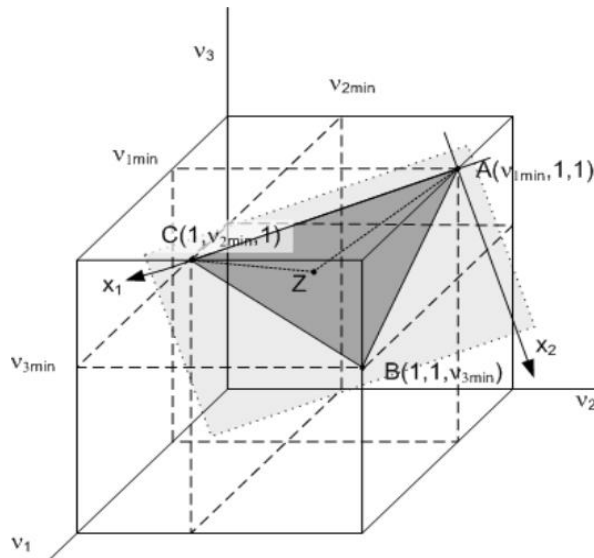


Рисунок 4.4 – Фазовий простір в координатах відносних потужностей

Слід зазначити, що для змінних $v_1, v_2, v_3 \in$ обмеження $v_{j\min} \leq v_j \leq 1$. Це обмеження обумовлено, в першу чергу, фізичною неможливістю роботи котла на навантаженнях нижче деякого мінімального значення, зазвичай рівного 30 % від максимального значення. По-друге, для виконання умови (4.17) при роботі двох з трьох котлів на повній потужності, тобто при $v=1$, третій котел повинен працювати з мінімальним навантаженням

$$v_{3\min} = N_Z - v_1 - v_2 = N_Z - 1 - 1 = N_Z - 2. \quad (4.18)$$

Внаслідок цього, якщо N_Z може бути забезпечено роботою тільки двох котлів, то $v_{j\min} = 0$. Цей факт можна використовувати як умову для відключення одного з котлів системою автоматичного управління.

Таким чином, задавши обмеження (4.17) і (4.18) ми переходимо до пошуку оптимуму на площині, що проходить через точки $A (v_{1\min}, 1, 1)$, $B (1, 1, v_{3\min})$, $C (1, v_{2\min}, 1)$. Прийmemo, що котли мають однакове обмеження на мінімальну потужність: $v_{1\min} = v_{2\min} = v_{3\min} = v_{\min}$.

Позначимо осі отриманої площини як x_1 і x_2 . Початок координат збігається з точкою A . Положення точки на площині визначається двома координатами. В якості таких координат виберемо відстані від шуканої точки $Z(x_1, x_2)$ до точки $A(0,0)$ і до точки $C(x_{1C}, 0)$. Тоді точка B на площині буде мати координати (x_{1B}, x_{2B}) .

Взаємне перетворення координат (v_1, v_2, v_3) і (x_1, x_2) виконується на основі рівності відстаней між точками в просторі і на площині:

$$r = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} = \sqrt{v_1^2 + v_2^2 + v_3^2}. \quad (4.19)$$

Фазова площина, для якої проводиться пошук мінімуму (максимуму) функції (4.15), показана на рисунку 4.5.

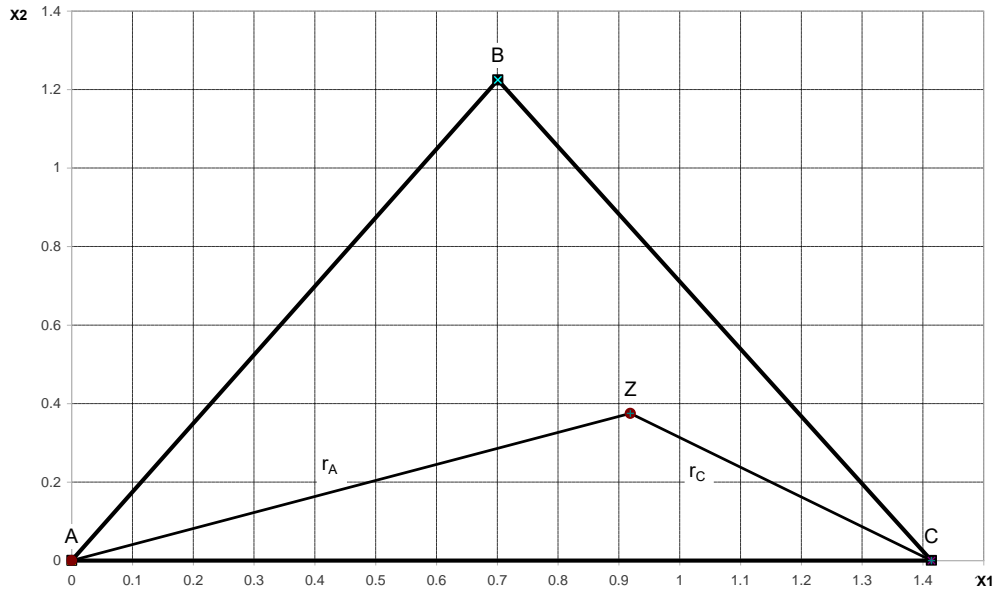


Рисунок 4.5 – Фазова площина для пошуку мінімуму функції

Для проведення процедури пошуку мінімуму функції $I(\eta, k_{zn})$ в координатах (x_1, x_2) необхідно ввести додаткові обмеження (точка мінімуму повинна знаходитися всередині трикутника ABC):

$$0 \leq x_1 \leq x_{1C}; x_2 \geq 0; x_2 \leq \frac{x_{2B}}{x_{1B}} x_1; x_2 \leq \frac{x_{2B}}{x_{1B} - x_{1C}} (x_1 - x_{1C}). \quad (4.20)$$

Розрахуємо координати точок A , B і C на площині виходячи з значень (v_1, v_2, v_3) для цих точок в просторі:

Координати точок A , B і C в фазовому просторі:

$$A(v_{1\min}, 1, 1), B(1, 1, v_{3\min}), C(1, v_{2\min}, 1). \quad (4.21)$$

Так як в якості початку відрілку обрана точка A , а напрямок осі $0x_1$ вибрано так, щоб вона проходила через точку C , можна записати:

$$x_{1A} = 0; \quad x_{2A} = 0; \quad x_{2C} = 0. \quad (4.22)$$

Для знаходження інших координат скористаємося співвідношеннями:

$$\sqrt{(x_{1A} - x_{1B})^2 + (x_{2A} - x_{2B})^2} = \sqrt{(v_{1A} - v_{1B})^2 + (v_{2A} - v_{2B})^2 + (v_{3A} - v_{3B})^2}, \quad (4.23)$$

$$\sqrt{(x_{1C} - x_{1B})^2 + (x_{2C} - x_{2B})^2} = \sqrt{(v_{1C} - v_{1B})^2 + (v_{2C} - v_{2B})^2 + (v_{3C} - v_{3B})^2}, \quad (4.24)$$

$$\sqrt{(x_{1C} - x_{1A})^2 + (x_{2C} - x_{2A})^2} = \sqrt{(v_{1C} - v_{1A})^2 + (v_{2C} - v_{2A})^2 + (v_{3C} - v_{3A})^2}. \quad (4.25)$$

Підставляючи (4.21) і (4.22) в (4.25) отримуємо:

$$\begin{aligned} \sqrt{(x_{1C} - 0)^2 + (0 - 0)^2} &= \sqrt{(1 - \nu_{1\min})^2 + (1 - 1)^2 + (1 - \nu_{3\min})^2} \\ x_{1C} &= \sqrt{2}(1 - \nu_{\min}) \end{aligned} \quad (4.26)$$

Підставляючи (4.21) і (4.22) в (4.23) отримуємо:

$$\begin{aligned} \sqrt{(0 - x_{1B})^2 + (0 - x_{2B})^2} &= \sqrt{(\nu_{1\min} - 1)^2 + (1 - 1)^2 + (1 - \nu_{3\min})^2} \\ x_{1B}^2 + x_{2B}^2 &= 2 \cdot (1 - \nu_{\min})^2 \end{aligned} \quad (4.27)$$

Підставляючи (4.21) і (4.22) в (4.24) отримуємо:

$$\begin{aligned} \sqrt{(x_{1C} - x_{1B})^2 + (0 - x_{2B})^2} &= \sqrt{(1 - 1)^2 + (\nu_{2\min} - 1)^2 + (1 - \nu_{3\min})^2} \\ (x_{1C} - x_{1B})^2 + x_{2B}^2 &= 2 \cdot (1 - \nu_{\min})^2 \end{aligned} \quad (4.28)$$

Вирішуючи сумісно рівняння (4.27) і (4.28) з урахуванням (4.26) отримуємо

$$x_{1B} = \frac{\sqrt{2}}{2}(1 - \nu_{\min}); \quad x_{2B} = \sqrt{1.5}(1 - \nu_{\min}). \quad (4.29)$$

Після знаходження координат точок A , B , C обчислюються обмеження (4.12) і проводиться пошук мінімуму функції $I(\eta, k_{zn})$ як функції двох змінних $I(\eta, k_{zn}) = f(x_1, x_2)$.

При цьому, на кожній ітерації пошуку необхідно проводити обчислення значень (ν_1, ν_2, ν_3) . Ці значення можна обчислити, вирішуючи систему рівнянь числовим методом:

$$\begin{cases} \sqrt{(x_1 - x_{1A})^2 + (x_2 - x_{2A})^2} = \sqrt{(\nu_{\min} - \nu_1)^2 + (1 - \nu_2)^2 + (1 - \nu_3)^2} \\ \sqrt{(x_1 - x_{1C})^2 + (x_2 - x_{2C})^2} = \sqrt{(1 - \nu_1)^2 + (\nu_{\min} - \nu_2)^2 + (1 - \nu_3)^2} \\ \nu_1 + \nu_2 + \nu_3 = N_Z \end{cases} \quad (4.30)$$

4.5 Моделювання АСУ

Представлений алгоритм розрахунку оптимальних значень навантаження котлів реалізований в пакеті Matlab. Причому, робота обладнання з обчисленням значень η, k_{zn} і $I(\eta, k_{zn})$ моделювалася в пакеті

Simulink, а обчислювальна пошукова процедура виконувалася шляхом виклику функції з командного рядка Matlab. Таким чином, вдалося врахувати динамічні властивості котлів і перехідні процеси, викликані зміною завдань регуляторам. Схема моделювання показана на рисунку 4.6.

Призначення блоків на схемі наступне:

N_z – блок для передачі заданих значень потужності з процедури пошуку мінімуму цільової функції на входи локальних регуляторів;

PID Controller 1, PID Controller 2, PID Controller 3 – блоки локальних ПІД регуляторів потужності;

Boiler1, Boiler2, Boiler3 – блоки, що моделюють статичні і динамічні властивості котлів;

Goto і From – стандартні блоки Matlab, що служать для передачі змінних від одних блоків іншим без відображення ліній зв'язків;

Subsystem – допоміжний блок для вироблення завдань локальним регуляторам в ручному режимі;

Time_work1, Time_work2, Time_work3 – блоки, що задають відносний час роботи кожного котла на частковому навантаженні;

Criterion – блок, який обчислює значення функції критерію пошуку найкращого навантаження;

To Workspace1, To Workspace2, To Workspace3 – блоки для передачі значень ККД, потужності цільової функції, відповідно, в робочий простір Matlab.

Решта блоків призначена для виведення графіків.

На рис. 4.6 показана реалізація критерія пошуку найкращого розподілу навантаження (4.15). Блок Gain1 і Gain2 відповідають коефіцієнтам a_1 і a_2 формули (4.15).

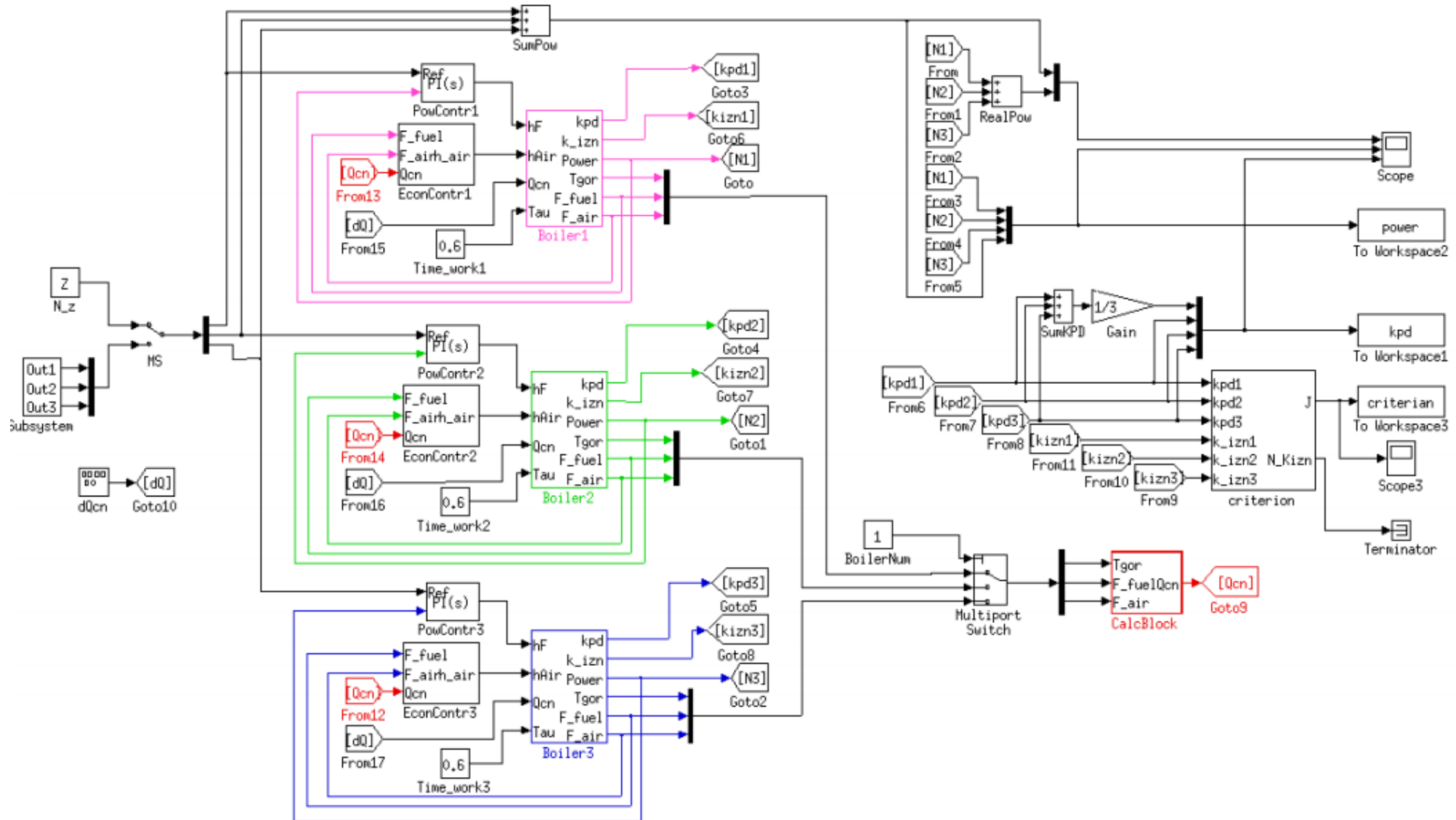


Рисунок 4.6 – Схема моделювання паралельної роботи трьох однотипних котлів

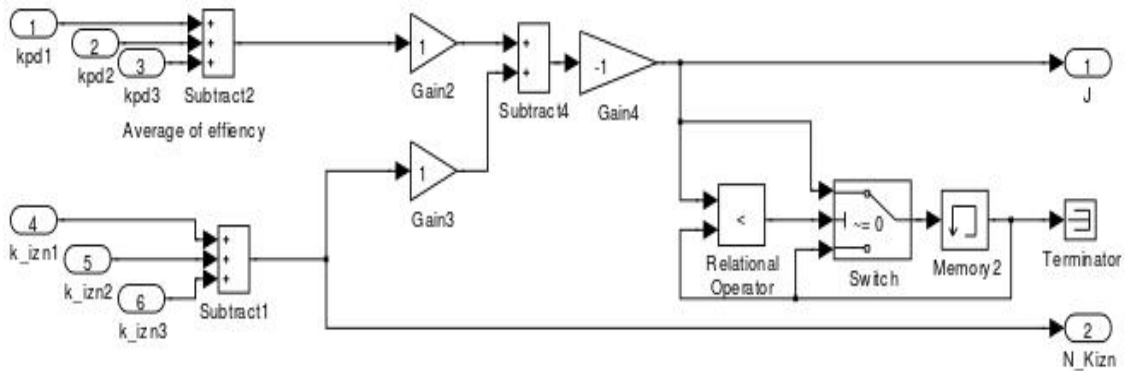


Рисунок 4.7 – Схема реалізації пошуку найкращого розподілу навантаження за рівнянням (4.15)

Для перевірки рішення прийняті наступні вихідні дані:

– котел № 1 має відносний час роботи на частковому навантаженні $\tau_1 = 0.8$, ККД котла описується виразом: $\eta_1 = 0.95 - 0.5 \cdot (v_1 - 0.95)^2$;

– котел № 2 має відносний час роботи на частковому навантаженні $\tau_2 = 0.7$, ККД котла описується виразом: $\eta_2 = 0.9 - 0.5 \cdot (v_2 - 0.9)^2$;

– котел № 3 має відносний час роботи на частковому навантаженні $\tau_3 = 0.6$, ККД котла описується виразом: $\eta_3 = 0.85 - 0.5 \cdot (v_3 - 1.0)^2$.

– сумарне завдання навантаження котлів $N_z = v_1 + v_2 + v_3 = 2,6$.

Графіки залежності коефіцієнта зносу, ККД та критерію пошуку для кожного з котлів показані на рис. 4.8.

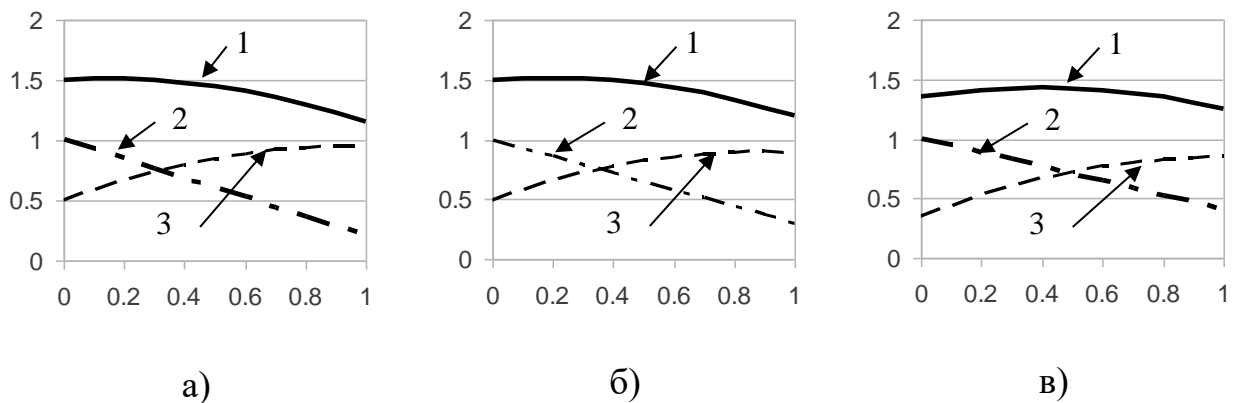


Рисунок 4.8 – Залежності сумарного навантаження котлів від відносного навантаження для котла: а) котел № 1, б) котел № 2, в) котел № 3;

1 – функція $I(\eta, k_{zn})$, 2 – коефіцієнт зносу k_{zn} , 3 – ККД $\eta(v)$

Методом прямого перебору, змінюючи відносну потужність v кожного котла, встановлено, що для заданої потужності максимум цільової функції становить $I_{\Sigma} = 3,8844$. При цьому, навантаження котлів склали: $v_1 = 0,775$, $v_2 = 0,825$ $v_3 = 1$.

Слід зазначити, що процедура пошуку методом прямого перебору виконувалася близько однієї години на ЕОМ з процесором Intel i3-380М з тактовою частотою 2,53 GHz. При цьому, значення відносних потужностей були взяті з ряду $v = [0,70 \ 0,75 \ 0,77 \ 0,84 \ 0,85 \ 0,9 \ 0,95 \ 1]$, в діапазоні від 0,77 до 0,84 крок зміни був 0,001. Тобто довелося розглянути $76^3 = 438976$ варіантів. З них заданої потужності $N_z = 2,6$ задовольнили 157 варіантів завдання навантаження.

Після цього було запущено процедуру пошуку оптимального розподілу навантаження з використанням динамічної моделі котлів. Структурна схема обміну даними між компонентами програмного пакету Matlab показана на рис. 4.9.

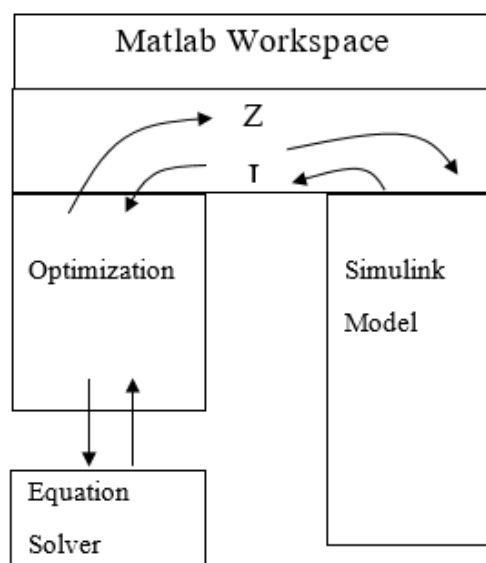


Рисунок 4.9 – Схема взаємодії між розрахунковими модулями пакета Matlab

Взаємодія між компонентами здійснюється через робочий простір Matlab. Процедура Optimization привласнює змінної Z значення заданих потужностей, які зчитуються в середовищі моделювання Simulink. Запуск процесу моделювання роботи котлів проводиться вбудованою функцією Matlab `sim ('Model_name')`. У свою чергу, з Simulink в робочу область зберігаються значення функції I за допомогою блоку ToWorkspace. Для коректної роботи пошукового методу в модулі розрахунку функції I кінцеве значення множиться на -1 . Таким чином, процедура Optimization здійснює пошук мінімуму функції.

Графіки перехідних процесів пошуку оптимального розподілу навантаження показані на рис. 4.10.

При моделюванні передбачалося, що сумарне навантаження котлів змінюватиметься від 2,1 до 2,6 одиниць максимального навантаження. Час пошуку мінімуму цільової функції з урахуванням динамічних характеристик котлів склало 955 с. При цьому, повний час виконання пошукової функції без урахування очікування перехідного процесу в котлах становив близько 1 хвилини.

Графік зміни значення цільової функції показаний на рис. 4.11.

Слід також зазначити, що при моделюванні система (4.30) мала чисельне рішення. Результати збіглися з точністю обчислень у Matlab.

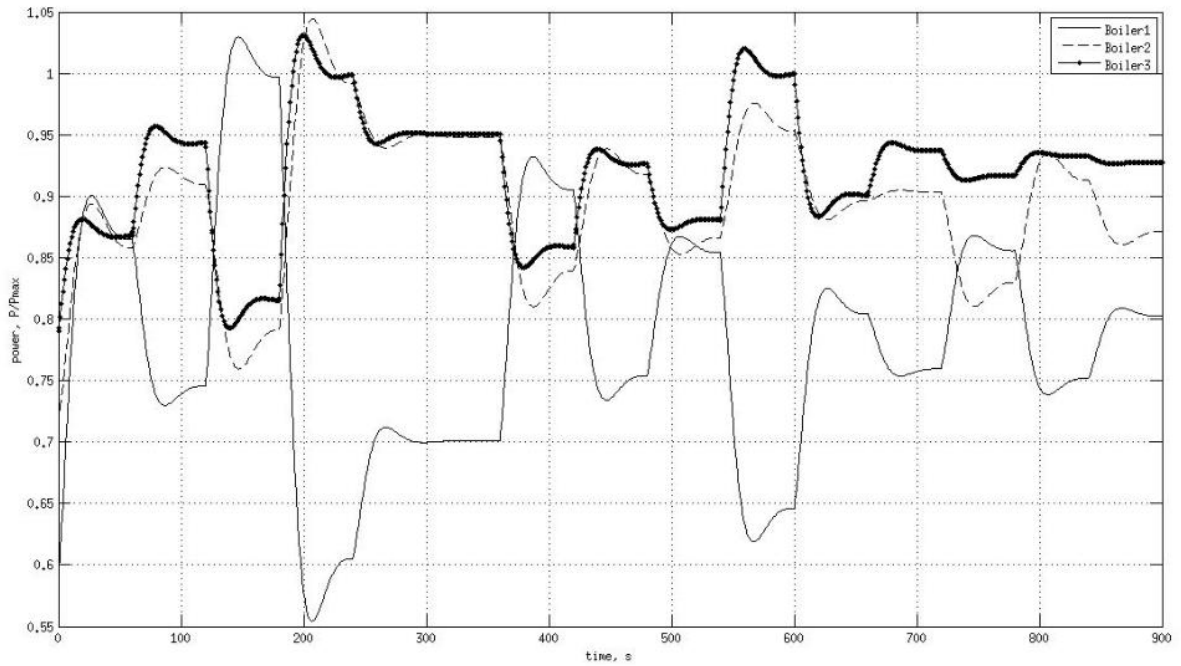


Рисунок 4.10 – Перехідні процеси в групі котлів при пошуку найкращого розподілу навантаження, де 1 – котел № 1, 2 – котел № 2, 3 – котел № 3

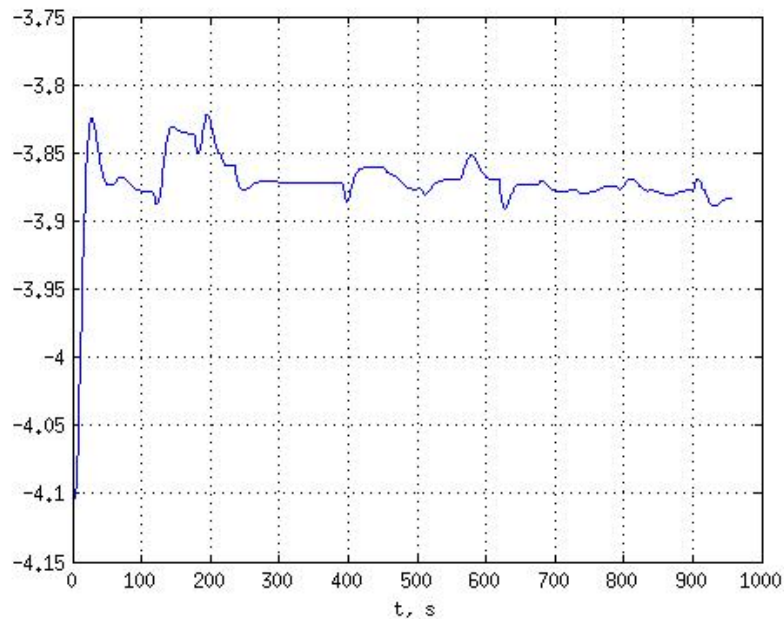


Рисунок 4.11 – Залежність значення функції I при зміні навантаження з 2,4 до 2,6 відносних одиниць

Виконані розрахунки свідчать, що вказаний алгоритм пошуку можна застосовувати для будь-якої кількості працюючого обладнання. Однак, отримати аналітичне рішення системи рівнянь аналогічної (4.22) вже важко

для чотирьох котлів тому, що необхідно вирішувати систему рівнянь третього порядку. Для п'яти котлів буде вже система рівнянь четвертого порядку. Однак використання чисельних методів дозволяє розв'язати задачу пошуку найкращого навантаження будь-якої кількості обладнання.

Продуктивність засобів обчислювальної техніки і цифрових регуляторів дозволяють реалізувати зазначений пошуковий алгоритм в складі сучасних АСУТП, тому що тривалість перехідного процесу регулювання при зміні завдання регулятора перевищує час розрахунку на два порядки.

4.6 Висновки до четвертого розділу

1. Запропоновано критерій пошуку найкращого розподілу навантаження, який враховує не тільки теплову ефективність кожного котельного агрегату, але і ступінь його зносу. Проведено моделювання роботи АСР при подачі збурення зміною навантаження.

2. Пошук мінімуму функції-критерію рекомендується проводити в режимі реального часу роботи АСУ ТП у зв'язку з тим, що час розрахунків на два порядки нижче, ніж час перехідних процесів. Пошук мінімального значення здійснювався за допомогою алгоритму на основі модифікованого симплекс метод Нелдера-Міда шляхом вибору управляючого впливу для зміни витрати палива в пальникових пристроях за рахунок використання компресора. Це дозволило здійснити автоматизоване управління по тепловому параметру за рахунок збільшення витрати газу через регулюючий орган у разі відповідності прохідного перерізу пальників або за рахунок зміни структури

обладнання у випадку такої невідповідності, що дало можливість здійснити роботу енергетичного обладнання в найкращому режимі, який забезпечується тепловим коефіцієнтом досконалості і ступенем зносу.

3. Показано перевагу розробленої пошукової процедури в порівнянні з відомими.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота містить отримані автором нові науково обґрунтовані результати, що складаються в модернізації Автоматизованої системи управління паровим котлом за рахунок ідентифікації змінного складу кісневмісного вуглеводневого палива при експлуатації на будь-яких рівнях потужності.

Отримані результати дозволяють зробити наступні висновки:

1. Забезпечення автоматичного регулювання паропродуктивності парових котлів, що працюють з якісним складом палива, який постійно змінюється, при виникаючих внутрішніх і зовнішніх збуреннях в теоретичному плані до кінця не вирішено. Рішення завдання забезпечення заданої ефективності в умовах регулярної випадкової зміни якісного складу палива вимагає пошуку нових розрахункових методів і моделей. Особливості експлуатації сучасних АСУ ТП для спалювання несертифікованих газів визначають завдання забезпечення якості регулювання. Гострота і важливість даного завдання визначається тим, що на науковому рівні на сьогоднішній день вона недостатньо розроблена. Аналіз перспектив розвитку сучасних АСУ ТП для технологій спалювання несертифікованих газів, насамперед в технологіях, де істотно змінюється щільність і питома теплотворна здатність показує, що істотно повинен бути змінений регулюючий орган подачі несертифікованого газу. Він повинен володіти суперечливими фізичними властивостями: в ряді випадків збільшувати витрату більше ніж бокові.

2. Для визначення умовної формули газоподібного вуглеводневого палива знайшов подальший розвиток метод визначення ентальпії складу суміші вуглеводневих кісневмісних газів в модельному уявленні її умовно формулою за складом продуктів згоряння в процесі спалювання з повітряною сумішшю в ізоентальпійном пристрої. Такий метод заснований на використанні законів Дальтона, хімічної кінетіки, збереження речовини і балансу максимальних валентностей окислювальних й відновлюваних елементів.

Метод відрізняється від відомих тим, що в співвідношенні балансу максимальних валентностей враховують окислювальні елементи, які містяться як в повітрі, так і в вуглеводневому кисневмісному газі для забезпечення повноти згоряння палива. Похибка розрахунків в порівнянні з табличними даними не перевищує 2 %.

3. Для забезпечення спалювання несертифікованого кисневмісного вуглеводневого газоподібного палива з максимальною ефективністю в паровому котлі отримала подальший розвиток математична модель барабанного котла, яка складається з рівнянь матеріального та теплового балансів, законів конвективного і променистого теплообміну. Модель відрізняється тим, що для врахування обмежень по пропускну здатності регулюючого органу для врахування впливу теплотворної здатності й густини горючих кисневмісних вуглеводневих газів в модель залучено можливість підвищення тиску газу в газопроводі за допомогою компресора. Це дозволило дослідити зміну характеристик парового котла в сталих та перехідних режимах, визначаючи зв'язок вихідних і вхідних параметрів. Введення в технологічну схему газового компресора дало можливість модернізувати типову АСУ теплового навантаження. Це дозволило на основі визначеного виду передавальної функції пристрою зв'язку між регулятором палива та компресорами встановити функціональну залежність для регулятора тиску в газопроводі для групи котлів, які працюють на загальний паропровід.

4. Для визначення динамічних характеристик групи парових котлів синтезовано АСУ теплового навантаження групи барабанних котлів, які працюють на загальний паропровід. Вирішено завдання автоматичного управління групою парових барабанних котлів в режимі реального часу, які використовують в якості палива ідентифіковані вуглеводневі кисневмісні гази змінного складу за допомогою пошуково алгоритму на основі модифікованого симплекс методу Нелдера-Міда. Вибір керуючого впливу для регулювання витрати палива за рахунок використання компресора дозволив здійснити автоматизоване управління по тепловому параметру за рахунок збільшення

витрати газу через регулюючий орган у випадку відповідності прохідного перетину пальників. У разі такої невідповідності за рахунок зміни структури обладнання, що дозволило здійснити роботу групи парових котлів в найкращому режимі, який забезпечується тепловим коефіцієнтом досконалості і ступенем зносу обладнання.

5. Розроблена автоматизована система управління котлами на основі ідентифікації змінного складу кисневмісного вуглеводневого є основою для модернізації АСУ будь-якою групою барабанних парових котлів з природною циркуляцією, характеризується максимальною температурою горіння палива і мінімальними викидами шкідливих продуктів горіння в навколишнє природне середовище. Проведена модернізація дала можливість використання будь-якого горючого газу в якості палива для барабанних котлів за рахунок запропонованих моделей та методів управління тепловим навантаженням барабанних котлів для регулюючого і базового режиму роботи.

Результати дисертаційної роботи пройшли випробування і були прийняті до впровадження на ПП «ЕСКО-Південь» Південної енергосервісної компанії, введені в навчальний процес на кафедрі «КТА» ОНПУ і при виконанні д/б роботи № ДР 0115U000411 при особистій участі здобувача в якості співвіконавця.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бондаренко А.В. Исследование высокотемпературного измерительного канала на основе хромель-алюминиевых термопар / А.В. Бондаренко, А.И. Брунеткин, **А.В. Лысюк** // Труды Одесского политехнического университета. – 2012. – Вып. 2 (39). – С. 268–272.

2. **Lysiuk O.** Determining the transient process time by the example of bodies heating using a modified homochronicity number / **O. Lysiuk**, A. Brunetkin, M. Maksymov // Автоматизация технологических и бизнес-процессов. – 2016. – Vol. 8, Iss. 4. – P. 43–49.

3. Brunetkin O.A simplified method for the numerical calculation of nonstationary heat transfer through a flat wall / O. Brunetkin, M. Maksymov, **O. Lysiuk** // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 2, Iss. 5 (96). – P. 4–13.

4. Maksymov M. Improvement of the control system over drum boilers for burning combustible artificial gases / M. Maksymov, V. Lozhechnikov, O. Maksymova, **O. Lysiuk** // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – No. 8 (88). – P. 10–16.

5. **Лысюк А.В.** Автоматизация распределения нагрузки между параллельно работающими котлами. / **А.В. Лысюк**, К.В. Беглов // Автоматизация технологических и бизнес-процессов. – 2017. – Том 9. – № 3, – С. 15–22.

6. **Лысюк А.В.** Модель и метод сжигания в теплоэнергетической установке углеводородного газа переменного состава / **А.В. Лысюк**, А.В. Бондаренко, М.М. Максимов, А.И. Брунеткин // Автоматизация технологических и бизнес-процессов. – Т. 9, № 2 – С. 21–27.

7. **Лысюк А.В.** Усовершенствование системы управления тепловой нагрузкой барабанного котла для сжигания горючих искусственных газов / **А.В. Лысюк** // Вісник ХНТУ.– 2017. – Т. 1, № 3 (62). – С. 180–185.

8. Максимов М.В. Математическая модель определения состава смеси углеводородных кислородосодержащих газов сжигаемого топлива / М.В. Максимов, А.И. Брунеткин, А.А. Максименко, **О.В. Лысюк** // Вчені записки таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського серія "Технічні науки". Том 29(68) №1, 2018. с.77-84.

9. **Лысюк А.В.** Усовершенствование АСУ барабанного котла для сжигания горючих искусственных газов / **А.В. Лысюк** // Автоматика 2017: XXIV Междунар. конф. по автоматич. управлению, 13–15 сентября 2017 г., г. Киев. – С. 88–89.

10. **Лысюк А.В.** Оптимизация работы группы котельных агрегатов при сжигании несертифицированного топлива / **А.В. Лысюк**, К.В. Беглов // Автоматика 2017: XXIV Междунар. конф. по автоматич. управлению, 13–15 сентября 2017 г., г. Киев. – С. 88–89.

11. Бондаренко А.В. Стенд для исследования динамики коэффициента излучения твёрдых тел при длительном нагреве / А.В. Бондаренко, А.И. Брунеткин, **А.В. Лысюк** // V Всеукр. научно-практич. конф. «Информационные технологии и автоматизация–2012», 10–11 октября 2012 г., г. Одесса, ОНАПТ. – 3 с.

12. **Лысюк А.В.** Усовершенствование системы управления тепловой нагрузкой барабанного котла для сжигания горючих искусственных газов / **А.В. Лысюк** // XVIII Міжнар. конф. з математичного моделювання, присвячена 100-річчю з дня народження академіка Ю.О. Митропольского, 18–22 сентября 2017 г., с.м.т. Лазурне, ХНТУ. – С. 73–74.

13. Брунеткін, О.І. Визначення складу суміші горючих газів при їх спалюванні/ О.І. Брунеткін, **О.В Лысюк** // International research and practice conference «Modern methods, innovations, and experience of practical, application in the field of technical sciences». Radom, Republic of Poland December 27 – 28, 2017. Radom Academy of Economics. – P. 76 – 78.

14. . Брунеткин А.И. Усовершенствованная типовая система управления тепловой нагрузкой барабанных котлов / А.И. Брунеткин, А.А Максименко,

О.В. Лысюк // Актуальные научные исследования в современном мире. Збірник наукових праць. Переяслав-Хмельницький. – 2018. – Вып. 2(34), часть 6. – С. 163–178..

15. Гительман Л.Д. Энергетический бизнес: учеб. пособие / Л.Д. Гительман, Б.Е. Ратников. – М.: Дело, 2006. – 600 с.

16. Долінський А. Державна цільова програма (проект) модернізації комунальної теплоенергетики на 2010–2014 роки / А. Долінський, Б. Басок, Є. Базеев // Вісн. НАН України. – 2009. – № 10. – С. 3–8.

17. Антонюк Л.Л. Регулювання та моделювання інноваційного розвитку регіону / Л.Л. Антонюк // Економіст. – 2007. – № 9. – С. 38–39.

18. Schüphaus K. Cleaning of coke-oven gas for use as fuel / K. Schüphaus // Steel Times. – 1997. – 225. – № 5. – P. 186–188.

19. Равич М.Б. Топливо и эффективность его использования: учеб. пособие / М.Б. Равич. – М.: Наука, 1977. – 358 с.

20. Сердюков О.В. Автоматизация котельных на базе ПТК «Торнадо-1» / О.В. Сердюков, А.И. Тимошин, А.А. Аbruковский [и др.] // Пром. АСУ и контроллеры. – 2003. – № 9. – С. 15–19.

21. Kislov V.M. Coke Gazification at Filtration Regime / V.M. Kislov, E.A. Salgansky, G.B. Manelis, [et al] // Int. Symp. on Nonequilibrium Processes, Combustion and Atmospheric Phenomena: Abstract booklet. – 2005. – Vol. 1. – P. 247–253.

22. Газификация древесины при фильтрационном горении со сверхadiaбатическим разогревом : отчет о НИР (заключ.) / ИПХФ РАН; науч. рук. Г.Б. Манелис. – Инв. № 33. – Черногoловка, 2001. – 72 с.

23. Говсиевич Е.Р. Современные проблемы топливообеспечения и топливоиспользования на ТЭС / Е.Р. Говсиевич, А.П. Мельников, О.Д. Селиверстова, В.И. Эдельман. – М.: Энергоатомиздат, 2002. – 368 с.

24. Лузин П.А. Регулирование температуры перегретого пара котельного агрегата / П.А. Лузин, М.П. Дунаев // Вестник ИрГТУ. – 2016. – № 5 (112). – С. 120–128.

25. Серебряков В.А. Системный подход к проблеме энергосбережения как средство повышения эффективности производства / В.А. Серебряков, Л.А. Копцев // Сталь. – 2002. – № 4. – С. 93–96.

26. Розенгарт Ю.И. Об условиях замены природного газа другим топливом / Ю.И. Розенгарт, Р.Г. Хейфец, Т.А. Дьяченко // Metallurg. и горноруд. пром-сть. – 1996. – № 2. – С. 61–63.

27. Салганская М.В. Фильтрационное горение влажного топлива / М.В. Салганская, С.В. Глазов, Е.А. Салганский [и др.] // Хим. физика. – 2008. – Т. XXVII. – № 1. – С. 20–25.

28. Салганский Е.А. Фильтрационное горение системы углерод – инертный материал в режиме со сверхадиабатическим разогревом / Е.А. Салганский, В.М. Кислов, С.В. Глазов [и др.] // Физика горения и взрыва. – 2008. – Т. XLIV. – № 3. – С. 30–38.

29. Канюк Г.И. Разработка системы автоматического управления паровыми котлами электростанций при сжигании низкосортных топлив / Г.И. Канюк, Ю.А. Мезеря, И.В. Сук, И.А. Бабенко, Е.Н. Близниченко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2016. – № 2 (84). Т. 6.

–
С. 44–51.

30. Пармон В.Н. Малая энергетика и нетрадиционные виды и источники энергии: их роль и место в энергетике Сибири в ближайшие годы и на перспективу / В.Н. Пармон, Ю.А. Груздков, А.П. Бурдуков [и др.] // Рос. хим. журн. – 1994. – Т. XXXVIII. – № 3. – С. 40–54.

31. Глушко В.П. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания: справ. АН СССР, ВИНТИ / В.П. Глушко/ – 1972. – Т. 1. – 266 с.: ил.

32. Максимов М.В. Модель и метод определения условной формулы углеводородного топлива при сжигании / М.В. Максимов, А.И. Брунеткин, А.В. Бондаренко // Вост.-европ. журн. передовых технологий. – 2013. – Т. 6. – № 8 (66). – С. 20–27.

33. Гурвич Л.В. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: справ. изд.: в 4-х т. / Гурвич Л.В., Вейц И.В., Медведев В.А. –1978. –Т. I. – Кн. 2. – 328 с.

34. Казаринов Л.С. Оперативное регулирование экономичности горения в энергетических котлах / Л.С. Казаринов, Т.А. Игнатова, А.В. Кинаш, О.В. Колесникова, Д.А. Шнайдер // Вестник ЮУрГУ. – 2008. – № 17. – С. 21–23.

35. Ковриго Ю.М. Модернизация системы управления тепловой нагрузкой прямоточного котлоагрегата ТЭС с использованием динамического корректора / Ю.М. Ковриго, М.А. Коновалов, А.С. Бунке // Теплоэнергетика. – 2012. – №10. – С. 43–49.

36. Расчет количества продуктов сгорания газообразного горючего неизвестного состава: материалы междунар. науч.-практ. конф. «Новые технологии в автоматизированном управлении: теория и практика», Одесса, 12-15 сент. 2013 г. / МОН Украины, ОНПУ. – ОНПУ, 2013. – 12 с.

37. Брунеткин А.И. Идентификация количественного состава неизвестного газообразного горючего и его продуктов сгорания на основе измеренных технологических параметров процесса сжигания топлива / А.И. Брунеткин, М.В. Максимов, А.В. Бондаренко // Вісн. НТУ «ХП»: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 12 (1055) – С. 131–141. – Бібліогр. : 6 назв.

38. Давыдов В.О. Метод расчета температуры горения произвольной смеси газообразного углеводородного топлива при произвольном избытке воздуха / В.О. Давыдов, А.В. Бондаренко // Тр. Одес. политехн. ун. – О., 2013. – Вып. 3 (42). – С. 98–102.

39. Веников В.А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем: учеб. для вузов / В.А. Веников, В.Г. Журавлёв, Г.А. Филиппова – М.: Энергоиздат, 1981. – 464 с.

40. Плетнёв Г.П. Автоматизированные системы управления объектами тепловых электростанций / Г.П. Плетнёв – М.: Изд-во МЭИ, 1995. – 353 с.

41. Лесничук А.Н. Использование сигнала по тепловосприятию топочных экранов для оценки теплонапряженности поверхностей нагрева барабанного котла / А.Н. Лесничук, В.А. Лошкарёв, Г.П. Плетнёв [и др.] // Вестн. МЭИ. – 1999. – № 3. – С. 56–60.

42. Ротач В.Я. Функции автоматизированной настройки в микропроцессорных автоматических системах управления – состояние, перспективы, подготовка пользователей / В.Я. Ротач, В.П. Зверьков [и др.] // Теплоэнергетика. – 1993. – М. – С. 2–7.

43. Сабанин В.Р. Регулирование нагрузки и обеспечение экономичности паровых котлов с экстремальным регулятором / В.Р. Сабанин, В.И. Кормилицын, В.И. Костык, Н.И. Смирнов, А.В. Коротеев, А.И. Репин // Теплоэнергетика. – 2014. – № 12. – С. 63–68. DOI: 10.1134/S0040363614110071

44. Load control and the provision of the efficiency of steam boilers equipped with an extremal governor Sabanin V.P., Kormilitsyn V.I., Kostyk V.I., Smirnov N.I., Koroteev A.V., Repin A.I. Thermal Engineering. 2014. T. 61. № 12. С. 905–910.

45. Казаринов Л.С. Корреляционно-экстремальная система управления энергетической эффективностью паровых котлов / Л.С. Казаринов, Д.А. Шнайдер, А.В. Кинаш, О.В. Колесникова // Вестник ЮУрГУ. – 2010. – № 2. – С. 81–85.

46. Журавлев А.А. Синтез и анализ законов управления системой регулирования уровня в барабане газомазутного парового котла с учетом экономии энергоресурсов / А.А. Журавлев, М.Л. Шит, О.Б. Попонова, Б.М. Шит // Проблемы региональной энергетики. – 2005. – № 1. – С. 43–52.

47. Акользин А.Н. Система автоматического управления водонагревательным котлом / А.Н. Акользин // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2013. – № 5 (142). – С. 210–215.

48. Ковриго Ю.М. Модернизация системы управления тепловой нагрузкой прямоточного котлоагрегата ТЭС с использованием динамического корректора / Ю.М. Ковриго, М.А. Коновалов, А.С. Бунке // Теплоэнергетика. – 2012. – №10. – С. 43 – 49.

49. Kovrigo Y.M. Modernizing the heat load control system of a once-through boiler unit at a thermal power station using a dynamic corrector / Y.M. Kovrigo, M.A. Konovalov, A.S. Bunke // Thermal Engineering.– 2012. Т. 59. № 10. P. 772–778.

50. Исмаходжаев С.К. Автоматическая система регулирования нагрузки котла при совместно-раздельном сжигании газов / С.К. Исмаходжаев // Теплоэнергетика. – 2014. – № 10. – С. 55–61. DOI: 10.1134/S0040363614100063

51. Ismatkhodzhaev S.K. An automatic closed-loop control system of boiler load for combined joint and separate combustion of gases / Ismatkhodzhaev S.K. // Thermal Engineering.– 2014. Т. 61. № 10. С. 747–753.

52. Рублев Г.М. Автоматическое регулирование тепловой нагрузки котла, сжигающего одновременно несколько видов топлива / Г.М. Рублев, Г.Д. Гарниц // Промышленная энергетика. – 1975. – № 6. – С. 30–31.

53. Косицын В.Ю. Система управления тепловой нагрузкой котла / В.Ю. Косицын, А.Н. Рыбалев, Д.А. Теличенко // Теплоэнергетика. – 2013. – № 2. – С. 54–60.

54. Kositsyn V.Y. A system for controlling the boiler heat load / V.Y. Kositsyn, A.N. Rybalev, D.A. Telichenko // Thermal Engineering. – 2013. Т. 60. № 2. С. 130–136.

55. Еремин Е.Л. Автоматизированная система регулирования расхода топлива на ТЭЦ / Е.Л. Еремин, Д.А. Теличенко // Информатика и системы управления. – 2011. – № 2 (38). – С. 157–168.

56. Медведев А.Е. Автоматическое управление тягодутьевым трактом водогрейного угольного котла / А.Е. Медведев, К.П. Волюков // Вестник КузбГТУ. – 2009. – № 6. – С. 49–52.

57. Лузин П.А. Регулирование температуры перегретого пара котлового агрегата / П.А. Лузин // Символ науки. – 2015. – № 9. – С. 96–98.

58. Богданов А.В. Система управления паровым котлом на основе многомерного четкого логического регулятора / А.В. Богданов // Научно-технич.вестник Поволжья. – 2011. – № 6. – С. 108–115.

59. Барский Л.А. Автоматизированная система управления горелочными устройствами парового котла / Л.А. Барский, А.М. Гельфанд, Л.М. Зайденберг, Л.П. Сережин, Ю.А. Шарыгин, А.В. Фоминов, П.Е. Никифоров // Теплоэнергетика. – 1999. – № 10. – С. 28–31.

60. Пат. 159833 России МПК F22B35/00 Система автоматического регулирования уровня воды в барабане котла / Е.Л. Еремин, Д.А. Теличенко; Заявитель и патентообладатель: Амурский государственный университет, Благовещенск – заявл. 29.06.2015.

61. Шкаровский А.Л. Разработка нового семейства интеллектуальных систем управления качеством сжигания топлива / А.Л. Шкаровский, О.Н. Новиков, А.В. Новикова, В.И. Полушкин // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 12-3. – С. 556–561.

62. Земцов Н.С. Синтез ПИД-регулятора для системы управления прямоточным котлом / Н.С. Земцов, Г.А. Французова // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. – № 9. Т. 16. – С. 631–636. DOI: 10.17587/mau.16.631-636

63. Сабанин В.Р. Исследование связанной системы автоматического регулирования нагрузки и экономичности работы парового котла с экстремальным регулятором на имитационной модели / В.Р. Сабанин, А.А. Старостин, А.И. Репин, А.И. Попов // Теплоэнергетика. – 2017. – № 2. – С. 82–92.

64. Sabanin V.R. Study of connected system of automatic control of load and operation efficiency of a steam boiler with extremal controller on a simulation model V.R. Sabanin, A.A. Starostin, A.I. Repin, A.I. Popov //Thermal Engineering.– 2017. Т. 64. № 2. С. 151–160.

65. Белавкин И.В. Оптимизация режимов энергетических котлов при сжигании ВЭР / И.В. Белавкин, Л.С. Казаринов // Вестник ЮУрГУ. – 2013. – № 2, Т.13. – С. 25–31.

66. Казаринов Л.С. Многосвязная система оптимального регулирования экономичности потребления топлива / Л.С. Казаринов, А.В. Кинаш, А.И. Зозуля // Вестник ЮУрГУ. – 2011. – № 2. – С. 64–69.

67. Финаев В.И. Система автоматической оптимизации в условиях неполноты данных на примере барабанного котла / В.И. Финаев, Д.А. Белоглазов, Е.Н. Павленко, В.В. Шадрин. // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2014. – № 11 (160). – С. 227–234.

68. Канюк Г.И. Модель энергетических потерь в котле тепловых электростанций и возможные пути их минимизации / Г.И. Канюк, А.Ю. Мезеря, Е.В. Лаптинова // Адаптивні системи автоматичного управління. – 2015. – № 2 (27). – С. 79–82.

69. Степанец А.В. Аудит качества работы алгоритмов управления барабанных паровых котлов на стадии проектирования системы автоматизации / А.В. Степанец, Л.А. Коропова // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. – № 2 (23). Т. 3. – С. 8–12.

70. Ильин И.В. Совершенствование автоматизированной системы управления и контроля парового котла, работающего под давлением / И.В. Ильин, А.Н. Машкин, В.В. Симин, Е.А. Уваров, В.Е. Рубахин // Безопасность труда в промышленности. – 2015. – № 10. – С. 86–89.

71. Кожевникова Н.Ю. Оптимизация систем управления паровыми котлами на теплоэлектростанциях / Н.Ю. Кожевникова, В.Ю. Фомин, А.Р. Хасанов // Новое слово в науке: перспективы развития. – 2015. – № 4 (6). – С. 151–153.

72. Конопацкий Ю.В. Оптимизация параметров системы управления котлоагрегата методом полного перебора / Ю.В. Конопацкий // Международная научно-практическая конференция «Информационные

технологии в экономических и технических задачах». – Пенза, 24-25 марта. – 2016. – С. 192–194.

73. Кожевникова Н.Ю. Внедрение автоматизированных систем управления паровыми котлами на теплоэлектростанциях / Н.Ю. Кожевникова, Т.А. Яшина, А.Р. Хасанов // Актуальные направления научных исследований: от теории к практике. – 2015. – № 2 (4). – С. 124–125.

74. Волков И.С. Математическая модель турбонаддувочного агрегата парового котла / И.С. Волков // Системы управления и обработки информации. – 2017. – № 2 (37). – С. 9–23.

75. Ковриго Ю.М. Обеспечение робастного управления в системах регулирования инерционных теплоэнергетических объектов / Ю.М. Ковриго, Т.Г. Баган, А.С. Бунке // Теплоэнергетика. – 2014. – № 3. – С. 9–14. DOI: 10.1134/S0040363614030059

76. Kovrigo Yu.M. Securing robust control in systems for closed-loop control of inertial thermal power facilities / Yu.M. Kovrigo, T.G. Bagan, A.S. Bunke // Thermal Engineering. – 2014. Т. 61. № 3. P. 183–188.

77. Борисов Г.Б. Анализ современных систем автоматизации котельных / Г.Б. Борисов // Теплоэнергетика. – 2010. – №6. – С. 2–11.

78. Афган Н.Х. Экспертная система для управления топочными процессами парового котла / Н.Х. Афган, М.Г. Карвальо // Теплоэнергетика. – 1996. – № 6. – С. 68–76.

79. Кинаш А.В. Автоматизированная система мониторинга показателей энергетической эффективности паровых котлов / А.В. Кинаш // Вестник ЮУрГУ. – 2010. – № 2. – С. 79–80.

80. Михлевский А.А. Опыт разработки и внедрения информационно-управляющей системы парового котла / А.А. Михлевский, А.И. Тесленко, В.И. Радзиевский, С.А. Михлевский // Теплоэнергетика. – 2000. – № 9. – С. 33–37.

81. Лебедев А.А. Применение модельного прогнозирующего управления для регулирования активной мощности энергоблока тепловой электростанции / А.А. Лебедев // Вестник ЮУрГУ. – 2009. – № 26. – С. 23–25.

82. Михайленко В.С. Применение гибридных сетей в адаптивных системах управления теплоэнергетических объектов / В.С. Михайленко, Р.Ю. Харченко // Научн. труды Винницкого технич. ун-та. – 2012. – № 1. – С. 1–9.

83. Зражевский Р.А. Моделирование цифровых регуляторов уровня в барабане парового котла / Р.А. Зражевский, В.И. Коновалов, В.В. Курганов, Д.Г. Бурмантов // Вестник науки Сибири. – 2011. – № 1(1). – С. 344–348.

84. Богданов А.В. Программная реализация нечеткого регулятора в системе управления парового котла ТЭС для адаптации ПИД-регулятора // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2-2. – С. 182–189.

85. Кулаков Г.Т. Комплексная методика оптимизации параметров динамической настройки регуляторов впрысков / Г.Т. Кулаков, М.Л. Горельшева // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2009. – № 3. – С. 59–66.

86. Кулаков Г.Т. Исследование влияния относительной постоянной времени инерционного участка пароперегревателя на качество пара за котлом в широком диапазоне изменения нагрузок / Г.Т. Кулаков, М.Л. Горельшева // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2008. – №5. – С. 53–60.

87. Журавлев А.А. Система автоматического регулирования температуры перегретого пара барабанного котла / А.А. Журавлев, М.Л. Шит, О.Б. Попонова, Б.М. Шит, А.Л. Зубатый // Проблемы региональной энергетики. – 2006. – № 1. – С. 16–29.

88. Курдюков А.П. Синтез робастного H_∞ -регулятора для управления энергетической котельной установкой / А.П. Курдюков, В.Н. Тимин // Управление большими системами. – 2009. – №25. – С. 179–214.

89. Кулаков Г.Т. Инвариантная система автоматического регулирования уровня воды в барабане котла / Г.Т. Кулаков, А.Н. Кухоренко // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2015. – № 2. – С. 35–47.

90. Журавлев А.А. Проектирование закона управления системой регулирования подачи топлива парового котла с учетом требований экономии энергоресурсов при управлении / А.А. Журавлев, М.Л. Шит, О.Б. Попонова, Б.М. Шит // Проблемы региональной энергетики. – 2005. – № 1. – С. 34–42.

91. Еремин Е.Л. Управление техническими системами в условиях неопределенности: мон. / Е.Л. Еремин, Д.А. Теличенко, Н.П. Семичевская, Л.В. Чепак, Е.А. Шеленок. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2014. – 211 с.

92. Евтушенко В.Ю. Нечеткая модель управления паровым котлом / В.Ю. Евтушенко, Е.Ю. Косенко // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2010. – № 1 (102). – С. 130–136.

93. Погорелов М.Е. Система векторного управления паровым барабанным котлом / М.Е. Погорелов // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2001. – № 5 (23). – С. 204–210.

94. Погорелов М.Е. Синергетический синтез системы управления котлоагрегатом при неполностью измеряемом векторе состояния / М.Е. Погорелов, А.А. Осташин // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2006. – № 6 (61). – С. 202–211.

95. Катин ВД. Пути рационального использования топлива и вторичных энергетических ресурсов в технологических печах НПЗ / В.Д. Катин, А.Н. Колмогоров, Н.А. Кожин // Нефтепереработка и нефтехимия : НТИС. – М.: ЦНИИТЭ Нефтехим, 1994. – № 6. – С. 34–36.

96. Ещенко А.А. Проблемы автономного управления в системе регулирования уровня в барабане и давления пара в котле / А.А. Ещенко // Вестник ИрГТУ. – 2012. – № 5 (64). – С. 158–162.

97. Авдеева О.В. Система экстремального регулирования горением топлива в котельной установке / О.В. Авдеева // Вестник Пензенского государственного университета. – 2015. – № 3 (11). – С. 167–174.

98. Валиева Л.З. Синтез законов регулирования системой управления парового котла в среде MATLAB / Л.З. Валиева // Междун. молодежн. науч.конф. XXII Туполевские чтения. – Казань, 19-21 октября. – 2015. – С. 64–66.

99. Шульгин С.К. Система гибридного параллельного нейрорегулирования температурой перегретого пара в котлоагрегате / С.К. Шульгин, В.А. Юрков, Д.О. Синепольский // МНПК «Новые задачи технических наук и пути их решения». – Пермь, 10 ноября 2016. – С. 193–196.

100. Павленко Е.Н. Формализация функционирования паровых котлов на основе технологической схемы / Е.Н. Павленко // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2008. – № 7(84). – С. 206–213.

101. Клишин В.А. Система автоматического управления и регулирования котлом № 1 паровоздуходувной станции ОАО "ЗСМК" / В.А. Клишин, П.В. Швецов, Н.В. Хуторной, А.Е. Кошелев // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2007. – № 1. – С. 10–13.

102. Медведев Д.А. Синтез системы автоматического регулирования парового котла БКЗ 75-39 с добавочными информационными каналами / Д.А. Медведев, Д.В. Немчинов // IV Международная научно-практическая конференция «European Scientific Conference». – Пенза, 7 июня 2017. – С. 70–73.

103. Шнайдер Д.А. Метод упреждающего управления сложными технологическими комплексами по критериям энергетической эффективности / Д.А. Шнайдер, Л.С. Казаринов // Управление большими системами. – 2011. – № 32. – С. 221–239.

104. Павленко Е.Н. Особенности управления и моделирования технологических процессов в паровых котлах в условиях неопределенности /

Е.Н. Павленко // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2008. – №4(81). – С. 184–188.

105. Новиков О.Н. Энергоэкологическая оптимизация сжигания топлива в котлах и печах регулированием соотношения «топливо-воздух» / О.Н. Новиков, Д.Г. Артамонов, А.Л. Пкаровский // Промышленная энергетика. – 2000. – № 5. – С. 57–60.

106. Fokion N. Non-premixed hydrocarbon ignition at high strain rates / N. Fokion, P.E. Dimotakis // Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion / The Combustion Institute. – 1998. – P. 641–648.

107. Sangiovanni J.J. Soot formation characteristics of well-defined spray flames / J.J. Sangiovanni, D.S. Liscinsky // Twentieth Symposium (International) on Combustion / The Combustion Institute. – 1984. – P. 1063–1073.

108. Buipham M. The asymptotic structure of premixed methane-air flames with slow CO oxidation / M. Buipham, K. Seshadri, F.A. Williams // Combustion and Flame. – 1992. – Vol. 89 – P. 343–362.

109. Shigeyuki T. A reduced chemical kinetic model for HCCI combustion of primary reference fuels in a rapid compression machine / T. Shigeyuki, F. Ayala, J. C. Keck // Combustion and Flame. – 2003 – T.133 – С. 467–481.

110. Tanaka K. Gas turbine combustor technology contributing to environmental conservation / K. Tanaka, K. Nishida, W. Akizuk // Mitsubishi Heavy Industries Technical Review. 2009. – Vol. 46. – N. 2. – P. 6–12.

111. Кудинов В.А. Испытания работы газогорелочного устройства с принудительной подачей воздуха и щелевой камерой / В.А. Яковлев // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 9. – С. 299–306.

112. Кудинов А.А. Влияние впрыска водяного пара в камеру сгорания газотурбинной установки на эффективность работы котла-утилизатора / Кудинов А.А., Горланов С.П. // Промышленная энергетика. – 2014. – № 12. – С. 32–35.

113. Потапов В.Н. Анализ схем подачи генераторного газа из биомассы и отходов для сжигания в камерных топках котлов / В.Н. Потапов,

В.В. Костюнин, А.С. Ханова, Н.И. Саутченко, И.А. Зимовец, К.В. Очайкин // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. – 2012. – № 3 (11). – С. 66–72.

114. Dobrovolska T. The Automated Control System of the Burning Fuel Process with a variable calorific capacity for the refining industry / T. Dobrovolska, V. Lozhechnikov // Journal of Automation and Information Sciences. 2016. – V. 48. – I. 10. – P. 25–30.

115. Максимов М.В. Модель и метод определения условной формулы углеводородного топлива при сжигании / М.В. Максимов, А.И. Брунеткин, А.В. Бондаренко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 6 (8). – С. 20–27.

116. Брунеткин А.И. Метод определения состава горючих газов при их сжигании / А.И. Брунеткин, М.В. Максимов // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2015. – № 5. – С. 83–90.

117. Kento T. Sensitivity of hazardous air pollutant emissions to the combustion of blends of petroleum diesel and biodiesel fuel / T. Kento, M. Gomez, M. Olson, T. Okuda, A. Walz, J. Schauer // Atmospheric Environment. – 2012. – T. 50. – P. 307–313.

118. Barbella R. The emission of heavy hydrocarbons from a diesel engine and a spray flame / R. Barbella, A. Ciajolo, A. D'Anna // Fuel. – 1989. – T. 68, June, – P. 690–696.

119. Alfe M. The effect of temperature on soot properties in premixed methane flames / M. Alfe, B. Apicella, J.-N. Rouzaud, [et al] // Combustion and Flame. – 2010. – T. 157. – P. 1959–1965.

120. Бондаренко А.В. Моделирование образования продуктов сгорания газообразного углеводородного топлива / А.В. Бондаренко // Судновые энергетические установки. – О., 2013. – Вып. 31. – С. 178–187.

121. Глушко В.П. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания: справ. / Под ред. В.П. Глушко. АН СССР, ВИНТИ – 1972. – Т. 2. Топлива на основе кислорода – 490 с.: ил.

122. Использование газа метантенков [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ru-ecology.info/post/101054102480015/>

123. Гурвич Л.В. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочное издание: в 4-х т. / Л.В. Гурвич, И.В. Вейц, В.А. Медведев и др.-3-е изд., перераб. и расширен.– Т. II. Кн. 2.-М.:Наука, 1978.–344с.

124. Рюль К. ВР: Прогноз развития мировой энергетики до 2030 года / К. Рюль // Вопросы экономики. – 2013. – № 5. – С.109–128.

125. Яковлев В.А. Испытания работы газогорелочного устройства с принудительной подачей воздуха и щелевой камерой / В.А. Яковлев // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 9. – С. 299–306.

126. Бундюк А.Н. Моделирование динамики топливно-воздушного тракта когенерационной энергетической установки / А.Н. Бундюк, Е.О. Улицкая, О.С. Ларионова // Праці Одеського політехнічного університету. – 2014. – № 2. – С. 122–129.

127. Ложечников В.Ф. Структура многомерной математической модели динамики барабанного котла средней мощности / В.Ф. Ложечников, А.А. Стопакевич // Труды Укр. акад. эконом. кибернетики (Южный научный центр). – Киев-Одесса: ИСЦ, 1999. – Вып.1. – Ч. 2. – С. 167–176.

128. ДСТУ ISO 6974-3:2007 Природный газ. Определение состава с заданной неопределенностью методом газовой хроматографии. Часть 3. Определение водорода, гелия, кислорода, азота, углекислого газа и углеводородов до C8 с использованием двух насадочных колонок (ISO 6974-3:2000, IDT).

129. Реймов К.М. Определение критерия оптимального распределения активной нагрузки между агрегатами ТЭС / К.М. Реймов // Автоматизированные технологии и производства.– 2016.– № 2 (12).– С. 25–27.

130. Басова Т.Ф. Экономика и управление энергетическими предприятиями: Учебник для студ. высш. учеб. заведений / Т.Ф. Басова, Е.И. Борисов, В.В. Бологова и др.; Под ред. Н.Н. Кожевникова. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 432 с.

ДОДАТОК А

Документи про впровадження

ЕСКО
Південь

**ПІВДЕННА ЕНЕРГОСЕРВІСНА
КОМПАНІЯ**

04.07.18 № 18/01-23
на № _____ від _____

Ректору Одеського національного
політехнічного університету
Оборському Г.О.

ПП «ЕСКО-Південь» впроваджує результати дисертаційної роботи аспіранта кафедри комп'ютерних технологій автоматизації Лисюка Олександра Вікторовича на тему «Автоматизована система управління котлами на основі ідентифікації складу кисневмісного вуглеводневого палива». Матеріали роботи, зокрема моделі і метод регулювання потужності групи барабанних парових котлів з природною циркуляцією автоматизованою системою управління технологічним процесом (АСУ ТП), надають можливість керувати енергетичним обладнанням у разі використання несертифікованих вуглеводневих палив, щоб мінімізувати викиди продуктів горіння в навколишнє природне середовище.

Модернізація АСУ ТП надає можливість одночасного використання природного газу і штучних (технологічних) горючих газів в якості палива за рахунок удосконаленої системи управління тепловим навантаженням барабанних котлів для регулюючого і базового режиму роботи, в наслідок чого забезпечується покращення екологічних і енергозберігаючих показників обладнання (зменшення викидів продуктів горіння та питомих енергетичних витрат).

Директор



О.А. Плотницький



УКРАЇНА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Ministry of Education and Science of Ukraine

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ODESSA NATIONAL POLYTECHNIC UNIVERSITY

пр. Шевченка, 1, м. Одеса-44, 65044 Україна
 тел.: +38 048 7223474, факс: +38 0482 344273

Shevchenko av., 1, Odessa-44, 65044 Ukraine
 phone: +38 048 7223474, fax: +38 0482 344273

E-mail: opu@opu.ua http://www.opu.ua, Код ЄДРПОУ 02071045

11.07.2018 № 1577/47-06
 На №

ДОВІДКА

про використання результатів дисертаційної роботи
 Лисюка Олександра Вікторовича,
 представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
 за спеціальністю 05.13.07 - «Автоматизація процесів керування»

Надана довідка затверджує, що матеріали дисертаційного дослідження Лисюка О.В. «Автоматизована система управління котлами на основі ідентифікації складу кисневмісного вуглеводневого палива» виконана відповідно до планів, затверджених Міністерством освіти і науки України, і є складовою частиною держбюджетної НДР №0115U000411 «Удосконалення теоретичних та експериментальних методів дослідження перехідних процесів в енергетичних установках за рахунок структурної оптимізації моделей і технічних систем», співвиконавець.

Довідка надана для подання до спеціалізованої вченої ради Д 41.052.01.

Проректор з наукової та
 науково-педагогічної роботи



Вик. Максимов М.В.
 Тел. 705-83-71

Д.В. Дмитришин



УКРАЇНА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Ministry of Education and Science of Ukraine

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ODESSA NATIONAL POLYTECHNIC UNIVERSITY

пр. Шевченка, 1, м. Одеса-44, 65044 Україна
 тел.: +38 048 7223474, факс: +38 0482 344273

Shevchenko av., 1, Odessa-44, 65044 Ukraine
 phone: +38 048 7223474, fax: +38 0482 344273

E-mail: opu@opu.ua http://www.opu.ua, Код ЄДРПОУ 02071045

11.07.2018 № 1578/47-06
 На №



ДОВІДКА

про використання результатів дисертаційної роботи
 Лисюка Олександра Вікторовича,
 представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
 за спеціальністю 05.13.07 - «Автоматизація процесів керування»

Надана довідка затверджує, що матеріали дисертаційного дослідження Лисюка О.В. «Автоматизована система управління котлами на основі ідентифікації складу кисневмісного вуглеводневого палива» Одеського національного політехнічного університету використовуються при викладанні дисциплін кафедрою Комп'ютерних технологій автоматизації:

- «Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів»;
- «Моделювання теплоенергетичного обладнання в АСУ»;
- «Динаміка теплових процесів».

Довідка надана для подання до спеціалізованої вченої ради Д 41.052.01.

Проректор з науково-педагогічної
 та виховної роботи



С.А. Нестеренко

Вик. Максимов М.В.
 Тел. 705-83-71

ДОДАТОК Б

Список публікацій здобувача

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Бондаренко, А.В. Исследование высокотемпературного измерительного канала на основе хромель-алюминиевых термопар / А.В. Бондаренко, А.И. Брунеткин, **А.В. Лысюк** // Труды Одесского политехнического университета. – Одесса, 2012. – Вып. 2(39). – С. 268 – 272. (Журнал включено до НМБД Index Copernicus, CrossRef (DOI))

2. Lysiuk, O. Determining the transient process time by the example of bodies heating using a modified homochronicity number [Text] / **O. Lysiuk**, A. Brunetkin, M. Maksymov // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів Volume 8, Issue 4/2016. – С. 43 – 49 (Журнал включено до НМБД Index Copernicus, CrossRef (DOI))

3. Brunetkin, O. A simplified method for the numerical calculation of nonstationary heat transfer through a flat wall [Text] / O. Brunetkin, M. Maksymov, **O. Lysiuk** // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 2, Issue 5(96). – P. 4 – 13. (Журнал включено до НМБД SCOPUS, Index Copernicus, CrossRef (DOI))

4. Maksymov, M. Improvement of the control system over drum boilers for burning combustible artificial gases / M. Maksymov, V. Lozhechnikov, O. Maksymova, **O. Lysiuk** // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – № 8(88). – P. 10 – 16. (Журнал включено до НМБД SCOPUS, Index Copernicus, CrossRef (DOI))

5. **Лысюк, А.В.** Автоматизация распределения нагрузки между параллельно работающими котлами / А.В. Лысюк, К.В. Беглов // Автоматизація технологічних та бізнес-процесів. – 2017. – Том 9. – № 3, – С. 15 – 22. (Журнал включено до НМБД Index Copernicus, CrossRef (DOI))

6. **Лысюк, А.В.** Модель и метод сжигания в теплоэнергетической установке углеводородного газа переменного состава / А.В. Лысюк, А.В. Бондаренко, М.М. Максимов, А.И. Брунеткин // Автоматизація

технологічних і бізнес-процесів. – Одеса, 2017. – Volume 9, Issue 2. – С. 21 – 27. (Журнал включено до НМБД Index Copernicus, CrossRef (DOI))

7. **Лысюк, А.В.** Усовершенствование системы управления тепловой нагрузкой барабанного котла для сжигания горючих искусственных газов / А.В. Лысюк // Вісник ХНТУ. – № 3(62), 2017 р. – Том 1. – С. 180 – 185. (Журнал включено до НМБД Index Copernicus, CrossRef (DOI))

8. Максимов, М.В. Математическая модель определения состава смеси углеводородных кислородосодержащих газов сжигаемого топлива / М.В. Максимов, А.И. Брунеткин, А.А. Максименко, **О.В. Лысюк** // Вчені записки таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського серія «Технічні науки». – Том 29(68), № 1. – 2018. – С. 77 – 84.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

9. **Лысюк, А.В.** Усовершенствование АСУ барабанного котла для сжигания горючих искусственных газов / А.В. Лысюк // Автоматика 2017: XXIV Междунар. конф. по автоматическому управлению, 13 – 15 сентября 2017 г., г. Киев. – С. 88 – 89.

10. **Лысюк, А.В.** Оптимизация работы группы котельных агрегатов при сжигании несертифицированного топлива / А.В. Лысюк, К.В. Беглов // Автоматика 2017: XXIV Междунар. конф. по автоматическому управлению, 13 – 15 сентября 2017 г., г. Киев. – С. 88 – 89.

11. Бондаренко, А.В. Стенд для исследования динамики коэффициента излучения твёрдых тел при длительном нагреве / А.В. Бондаренко, А.И. Брунеткин, **А.В. Лысюк** / V Всеукр. научно-практич. конф. «Информационные технологии и автоматизация – 2012», Одесса. – 10 – 11 октября 2012 г. – ОНАПТ, 2012. – С. 3.

12. **Лысюк, А.В.** Усовершенствование системы управления тепловой нагрузкой барабанного котла для сжигания горючих искусственных газов / А.В. Лысюк // XVIII Междунар. конф. З математичного моделювання,

присвячена 100-річчю з дня народження академіка Ю.О. Митропольського, 18 – 22 сентября 2017 г., с.м.т. Лазурне. ХНТУ – С. 73 – 74.

13. Брунеткін, О.І. Визначення складу суміші горючих газів при їх спалюванні/ О.І. Брунеткін, **О.В Лисюк** // International research and practice conference «Modern methods, innovations, and experience of practical, application in the field of technical sciences». Radom, Republic of Poland December 27 – 28, 2017. Radom Academy of Economics. – P. 76 – 78.

14. . Брунеткин А.И. Усовершенствованная типовая система управления тепловой нагрузкой барабанных котлов / А.И. Брунеткин, А.А Максименко, **О.В. Лысюк** // Актуальные научные исследования в современном мире. Збірник наукових праць. Переяслав-Хмельницький. – 2018. – Вып. 2(34), часть 6. – С. 163–178.