
СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

УДК 536.46

Т. С. Арзікулов, Т. Г. Баган

АНАЛІЗ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСАМИ ГОРІННЯ НА ОСНОВІ ЗАСОБІВ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ ТА ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ

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

Анотація. Тенденції на світовому ринку до підвищення енергоефективності та екологічності традиційних засобів отримання енергії, таких як промислові котлоагрегати, спричинили необхідність широкого впровадження та використання новітніх засобів оптимального управління даними об'єктами. Понад 60% світової енерго-генерації відбувається через процес спалення палива. В українському науковому просторі значну увагу приділяють аналітичним, предиктивним та нечітким регуляторам, як засобам оптимального управління, та майже не представлене використання більш нової та перспективної галузі використання засобів комп'ютерного зору, яка, в зв'язку з високим рівнем розвитку інформаційних технологій в країні, є досить перспективною для майбутнього розвитку технологій енергоефективності, в тому числі й на експортному ринку. Стаття розглядає процес розвитку та становлення сучасного напрямку використання засобів комп'ютерного зору для оптимізації процесу спалення різних типів палива. Розглядається шлях та сучасні тенденції розвитку. За тридцять п'ять років проведення досліджень було відзначено значно більшу швидкодію та досить широкий спектр аналітичної інформації, що може бути представлена системами подібного типу у порівнянні з іншими. Починаючи з відносно простих одно-параметричних систем моніторингу та оптимізації, які за рахунок швидкодії були здатні поліпшити протікання перехідних процесів та зробили можливими використання систем в екстремальних режимах, тридцять років тому, до складних комплексних та багато-параметричних систем, що виконують оптимізацію за сукупністю параметрів, вже через двадцять років досліджень. Системи комп'ютерного зору надають широкий спектр аналітичної інформації, що може бути використана як в процесі автоматичного керування, так і для визначення якісних показників використання котлоагрегата.

Ключові слова: керування Моніторинг, обробка зображень, комп'ютерний зір, факел, горіння.

Abstract. Trends in the world market to increase the energy efficiency and environmental friendliness of traditional means of obtaining energy, such as industrial boiler units, have caused the need for widespread implementation and use of the latest means of optimal management of these objects. More than 60% of the world's energy generation occurs through the process of burning fuel. In the Ukrainian scientific space, considerable attention is paid to analytical, predictive and fuzzy regulators as means of optimal management, and the use of a newer and more promising field of computer vision, which, in connection with the high level of development of information technologies in the country, is almost not represented, is quite promising for the future development of energy efficiency technologies, including in the export market. The article examines the process of development and formation of the modern direction of using computer vision tools to optimize the process of burning different types of fuel. The path and modern trends of development are considered. Over thirty-five years of research, significantly higher speed and a fairly wide range of analytical information, which can be presented by systems of this type compared to others, were noted. Starting with relatively simple single-parameter monitoring and optimization systems, which due to their speed were able to improve the flow of transient processes and made possible the use of systems in extreme mode, thirty years ago, to complex and multi-parameter systems that perform optimization based on a set of parameters, already after twenty years of research. Computer vision systems provide a wide range of analytical information that can be used both in the process of automatic control and to determine the quality indicators of boiler unit use.

Keywords: management; monitoring; image processing; computer vision; analysis; torch; combustion.

DOI: 10.31649/1681-7893-2023-45-1-55-63

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

ВСТУП. ПРИЧИНИ НЕОБХІДНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ТА РОЗВИТКУ НОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ В СФЕРІ ПРОМИСЛОВОГО СПАЛЕННЯ ПАЛИВА

Питання підвищення ефективності чи зниження кількості спалення вуглеводнів є одним із ключових на сьогоднішній день. Стрімке зростання споживання ресурсів людством підняло проблему їх виснаження, яка може загрожувати значною кризою вже в цьому столітті. Незважаючи на стрімкий розвиток технологій використання відновлюваних джерел енергії, вони не набули достатньо широкого розповсюдження через складність та дороговизну.

Так, наприклад, згідно статистичних даних IEA (International Energy Agency) [1], електрогенерація заснована на спаленні вуглеводнів (вугілля, газ) у світі зросла з 2000 року зі значенням 9 954 тис. ГВт, до 17 099 тис. ГВт у 2018 році. Тобто зросла більше ніж в півтора рази. Щоправда, починаючи з 2019 року в статистиці спостерігається певний спад, що тим не менш, викликаний скоріше впливом епідемії COVID-19, а не розвитком енерго-зберігаючих технологій. В 2020 році генерація заснована на спаленні вуглеводнів складала 16 455 тис. ГВт.

Звісно у відносному значенні потужність генерації заснованої на відновлюваних джерелах зросла значно більше. Із 2 828 тис. ГВт у 2000 році, до 7 481 тис. ГВт у 2020 році. Це зростання у 2.6 разів. Проте цього недостатньо, щоб говорити про відмову від спалення вуглеводнів у найближчі десятиріччя. Загальна електрогенерація у світі, враховуючи усі джерела, згідно даних IEA, у 2020 році складала 26 720 тис. ГВт. Це означає, що 61,5% електроенергії в світі отримані шляхом спалення вуглеводнів. Ще 28% отримані з відновлюваних джерел, деякі з яких також спалюються (біогаз, біомаса). Оглянувши наведені вище дані, можемо зробити висновок про необхідність створення та імплементації технологій, що забезпечать більш ефективне та економне застосування ресурсів.

Згідно відкритих джерел інформації, на території України до початку повномасштабної війни діяло 105 підприємств енергетичного сектору. З цих 105, 65 побудовано в період до 2000 року. З означених 65, 49 використовують теплову енергію, або точніше - енергію від спалення газу чи вугілля. З решти 40, що засновані після 2000 року, ще 16 також використовують теплову енергію.

Згідно інформації Укрстату, на теплових ТЕС вироблялося 11% електроенергії України, та 31,5% теплової енергії за 2020 рік. При цьому, сумарна потужність ТЕЦ та ТЕС, заснованих у минулому сторіччі, більш ніж у 45 разів перевищує потужність підприємств, побудованих у цьому.

Враховуючи складний економічний клімат, що супроводжував розвиток енергетичного сектору в Україні, модернізація більшості об'єктів енергетичного сектору здійснювалась за принципом вимушеної необхідності. Це викликає проблему енергоефективності таких об'єктів та створення нових, економічно вигідних проектів модернізації.

ТЕЦ - складний складний комплекс задачею якого є вилучення передача та трансформація потенційної енергії, що закладена в паливі. В основу технологічного процесу покладено явище виділення енергії при його спаленні. Тож, незважаючи на багато інших аспектів підвищення ефективності ТЕЦ, ми будемо розглядати саме засоби підвищення ефективності спалення, що відбувається всередині котлоагрегатів. Попри значний розвиток матеріально-технічної бази, як то котлоагрегатів, пальників, систем допалу димових газів та іншого, важливу роль у ефективності використання котлоагрегатів відіграють саме системи контролю та автоматизованого управління. Саме вони забезпечують ефективне та безпечне використання обладнання у номінальних режимах роботи. Деякі з них, точніше процес їх розвитку, і є предметом розгляду даної статті.

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

Сучасні неklasичні методи контролю та керування процесами спалення палива в котлоагрегатах пропонують використання таких методів як: предиктивний контроль на основі математичної моделі котлоагрегата; використання адаптивної системи керування на основі методів машинного навчання; використання систем з нечіткою логікою. Використання цих методів досить поширене, вони мають широку методологічну та теоретичну базу.

Ще одним методом, який не набув широкого розповсюдження, але який має значні перспективи розвитку є керування процесом спалення на основі даних отриманих при обробці зображення факела. Також знаний як: "Image processing for combusting control". Розвиток концепції почався з робіт [2, 4] де були викладені основні концепції, які є актуальними по цей час. Пізніше, в роботі [5] були викладені спільні напрацювання авторів попередніх робіт. Принципи, що були закладені ними, є майже незмінними по наш час.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

Окремо зазначу, що розвиток систем моніторингу та аналізу зображення факелу є важливим фактором до використання засобів та методів комп'ютерного зору в процесах керування спаленням палива.

Так, наприклад, робота [2] пропонувала використовувати системи цифрової обробки зображення факелу для отримання наступних даних:

- розмір, розташування та форму факела/фронту факела;
- розрахунок трендів розміру, розташування та форми факела/фронту факела;
- обраховувати стабільність процесу горіння;
- фіксувати ненормальні стани процесу горіння.

Вже тоді зазначалось, про значно більшу швидкість отримання інформації за допомогою відеокамер, ніж через традиційні засоби контролю.

Хоча робота [2] розглядає своїм об'єктом твердопаливні котли, в яких паливо рухається по колосниковій решітці, принципи закладені в роботі, що до отримання якісних даних про процес горіння, є універсальними. Адже базуються на математичній обробці зображення, що, як і зараз, є звичайним набором значень інтенсивності опромінення фото-транзисторів на матриці відеокамери, тобто - матрицею.

Так, в роботі було запропоновано використовувати гістограму світимості зображення для визначення наявності полум'я в топці. Ідентифікації задимленості.

Метод кластеризації був запропонований для визначення форми і розмірів і розташування зони горіння, виявлення "кратерів". Хоча цей метод не відповідає сучасним стандартам, але він, фактично, є попередником градієнтного методу визначення меж об'єктів.

Запропоновані методи визначення динамічних характеристик факела базуються на статистичному аналізі обрахованих характеристик розміру та розташування зони горіння які зібрані за період 1-2 хвилини. Такий підхід обумовлюється специфікою процесу спалення палива на колосникових решітках. В результаті роботи була запропонована схема представлення даних оператору у числовому та графічному вигляді. Також була припущена можливість передачі числових даних в систему автоматичного управління, що було реалізовано в роботі [5].

Приблизно одночасно зі статтею [2] вийшла робота [3], що описує методи оцінки вмісту оксидів азоту в димових газах пило-вугільних котлів. Нажаль, детальніше розкрити вміст роботи неможливо через обмежений режим доступу. Хоча ці дві роботи не стосуються безпосередньо процесу керування, вони є важливими для подальшого розвитку систем комп'ютерного зору в застосунках контролю систем спалення палива. Першу систему керування процесом спалення було описано в статті [4]. Два фінські дослідники описали систему отримання даних процесу горіння в реальному часі для їх використання в процесі автоматизованого керування за допомогою методів обробки зображення.

Були представлені два методи контролю, що базуються на інформації отриманій через обробку зображення факелу. Робота розглядала методи оптимального спалення палива в пило-вугільних котлах, за основу були взяті такі параметри як світимість та стабільність факелу. Було розглянуто структуру системи аналізу та автоматизованого керування, яку на той час стала, можна сказати, "класичною" (рис. 1). На відміну від загальноприйнятих методів керування в той час, було запропоновано використовувати індивідуальне керування кожним пальником, що дозволило отримати швидшу реакцію системи та більшу точність керування.

DIMAC (Digital Modular Aerial Camera) систему зображено на рис. 1, складається з аналітичних приладів (AU), по одному на кожну камеру (плюс резервні), приладів загального контролю, які, в тому числі, керують вводом резервних AU (CU), проміжних приладів для зберігання та управління відеоданими, промислового комп'ютера та засобів моніторингу.

Використання подібної модульної архітектури, із відокремленими приладами аналізу зображення підвищує надійність системи та дозволяє знизити вимоги по розрахункових можливостях для кожного окремого елемента, що є важливим і в наш час, вважаючи експоненційне зростання вартості від розрахункових можливостей. Більше того, подібна архітектура активно використовується в багатьох промислових застосунках систем комп'ютерного зору в наш час. Що до способів керування процесом спалення палива - пропонувалось використовувати схему корекції надлишку повітря, на основі стабільності факелу, та схему корекції подачі повітря в пальник, на основі світимості факелу.

В своїй спільній роботі [5] дослідники скомпонували свої теоретичні надбання та обговорювали вже імплементовану систему керування. На жаль, робота викладена з обмеженим режимом доступу. Проте, через рік, на міжнародному конгресі "COMADEM '97", були опубліковані матеріали, що до впровадження системи на чеській електростанції в місті Детмаровіце [6]. Що базувалась більшою частиною на роботі [5]. Розглядалось використання системи DIMAC, як складової системи зниження рівня викиду оксидів натрію.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

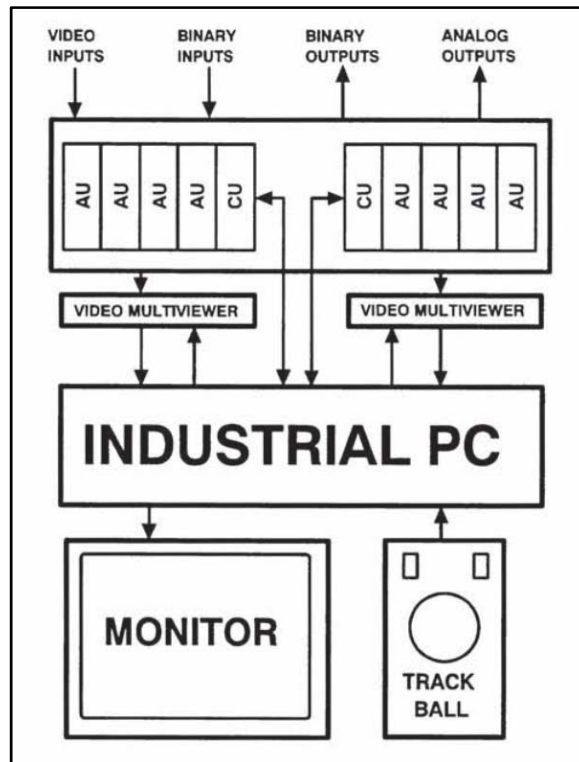


Рисунок 1 – DIMAC-system (DMAIC)

Результатом впровадження системи з низьким вмістом оксидів натрію, частиною якої є DIMAC-система, були досягнуті такі результати:

- Зменшення викидів оксидів натрію на 50-70%;
- Зниження рівня кисню в димових газах на 0,1%;
- Вміст недоспалених часток карбону зменшився нижче прогнозованого рівня у 3.5%;
- Зменшилась температура димових газів;
- Та інші.

Хоча дані, отримані в результаті аналізу зображень системою DIMAC не приймали безпосередньої участі в процесі керування, відзначається їх важливе значення для оперативного персоналу. Збільшення якості обізнаності персоналу про процеси всередині котла.

Ще однією важливою роботою, яка стосувалась безпосередньо використання інформації, отриманої через системи комп'ютерного зору, була стаття "An imaging neural network combustion control system for utility boiler applications" [7]. В роботі розглядається використання аналітичної нейронної мережі для розпізнавання видимих патернів хімічного стану горіння з ціллю контролю кількості викидів. Тобто - обговорюється використання повноцінної системи керування, заснованої на обробці зображення факела. Обговорюється структура системи, алгоритми та тестові запуски, що доводять придатність використання систем подібного типу на основі коротко-тривалих тестових запусків. Режим доступу до роботи також обмежений.

Досить незвичний для того часу підхід був запропонований британськими вченими Юпінгом Хуангом, Йонг Яном та іншими, який вони виклали у роботі [8]. Підхід базується на отриманні якісних даних про процес спалення саме газоподібного палива базуючись на отриманні частотних та спектральних характеристик зображення. Схема установки, що вони використовували в дослідженнях досить стандартна і подібна до тих, що були наведені в попередніх роботах, зображена на рис. 2. Особливістю запропонованої схеми було використання CCD камери, яка відрізняється значно більшою частотою кадрів.

Запропонована схема керування, на основі частотних характеристик зображення факела не отримала розповсюдження у той час через надзвичайно високу вартість високочастотних камер порівняно з промисловими. До того ж, висока частота отримання інформації вимагає також більших розрахункових можливостей для обробки отриманої інформації, а отже і збільшується вартість апаратного забезпечення.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

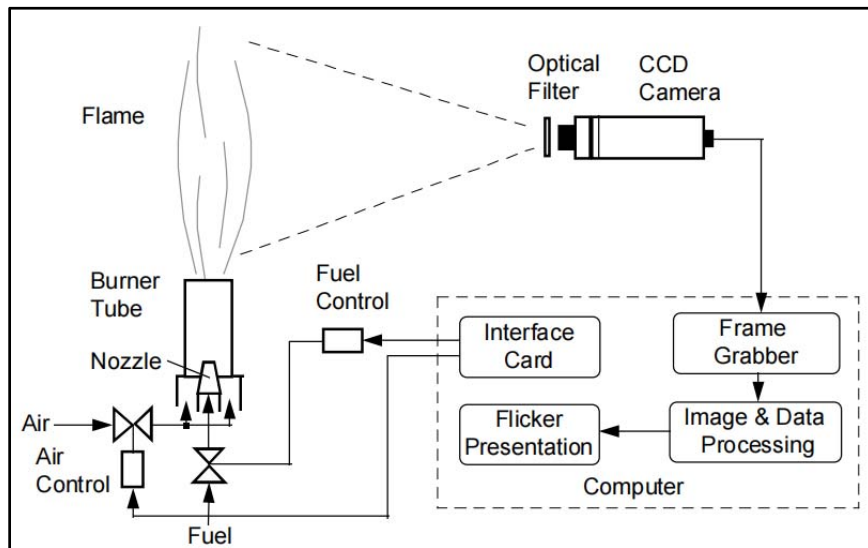


Рисунок 2 – Схема дослідження характеристик факелу при використанні пальників попереднього змішування

Запропонована у роботі методика «спектрального» аналізу є, насправді, методикою аналізу розподілу яскравості зображення між різними рівнями (гістограма). Що, безперечно, також пов'язане з режимом спалення палива.

Наступного року, від вчених того ж університету вийшла наступна робота [9], в якій більш детально розглянуто систему керування, що базується на нейронній мережі з учителем, яка складається з чотирьох шарів. На відміну від попередніх робіт, зазначається використання оцінки геометричних параметрів факела, що фіксуються камерою. (рис. 3).

В роботі також розглянута залежність розподілу яскравості монохромного зображення факела (гістограма), в залежності від режиму горіння палива.

Результатом є виявлення стійких залежностей між геометричними характеристиками факелу та розподілом яскравості факелу із режимами горіння газового факелу. Відповідно - придатність параметрів для використання в системах автоматизованого контролю, що було випробувано в ході експериментів.

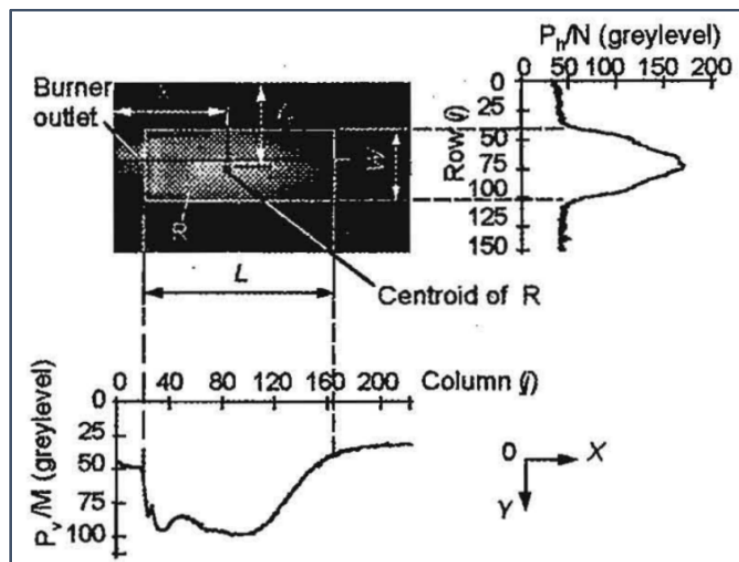


Рисунок 3 – Оцінювання геометричних характеристик проекції факелу

В 2000 році, на міжнародній конференції з обробки зображень [10] були представлені матеріали, що до алгоритму три-етапної обробки кольорових зображень факелу й створення історичних трендів на основі отриманих даних.

ОБГОВОРЕННЯ

Системи моніторингу та управління розвивались не тільки для застосунків газових котлів, але й для пиловугільних. Так робота [11] описує впровадження системи моніторингу та аналізу геометричних та люмінесцентних характеристик факелу. Пізніше, в роботі [12], було описано створення більш розвинутої системи моніторингу та якісного онлайн аналізу, яка базується на використанні двох високопродуктивних монохромних камер із змінними спектральними фільтрами. Система могла забезпечувати аналіз широкого кола параметрів та передавати їх операторам. Проте, саме оператори, спираючись на аналітичні дані, виконували операції керування чи внесення змін в налаштування традиційних систем керування.

Дуже цікава робота [13] виходить у 2004 році. Фактично, це одне з перших застосувань камери ближнього інфрачервоного спектру для динамічної онлайн характеристики газового факелу з попереднім змішуванням газо-повітряної суміші. Використання саме ближнього-інфрачервоного спектру спричинене нестабільністю випромінювання факела досліджуваної суміші у видимому спектрі, а, також, знаходженням більшої частини випромінювання в інфрачервоному діапазоні, що характерне для усіх видів горіння. Результати дослідження продемонстрували, що використання відсікаючих фільтрів дозволяє досягти більшої точності визначення динамічних характеристик факела за рахунок зменшення девіацій, викликаних випромінюванням суміжних спектрів.

Дуже цікавою є робота китайських дослідників [14], в якій розглядається питання використання інформації отриманої від камер, що спостерігають за пило-вугільним факелом, для обрахунку мапи розподілення температури у топці та її візуалізації у 3-Д форматі. Хоча в роботі відсутній якісний аналіз самого факелу, проте використання якісних характеристик його випромінювання лежить в основі обрахунку. Цей напрямок застосування засобів комп'ютерного зору розвивався паралельно і дуже стрімкими темпами, в тому числі й в наступних роботах авторів. Тож подальші роботи з цього напрямку в статті розглядатись не будуть.

Попередні статті розглядали процес аналізу зображення факелу через камери, що працюють лише з одним каналом / спектральним діапазоном. Проте, починаючи з середини 00-х, починає розвиток метод мульти-варіативного аналізу зображення, де використовується більше як один канал вимірювання. Роботи [15, 16] стали першими, що почали використання нового для галузі методу якісного аналізу факелу для побудови аналітичних та предиктивних моделей.

Безперечно, важливою є робота китайських вчених Хуавеї Хуанга та Янг Жанга [17] в якій вони вивчали залежність спектру випромінювання факелу метану у видимому діапазоні від режимів горіння. Інформація отримувалась за допомогою цифрової RGB камери.

Крім нових методів аналізу, з'являлись і нові методи контролю. Так на німецькій конференції [18] присвяченій питанням штучного інтелекту була представлена доповідь, що описувала систему керування спаленням палива з самоорганізацією на основі машинного навчання. Особливістю системи було використання як класичних методів отримання інформації, так і методів комп'ютерного зору (аналізу зображення факела). Стратегія керування ж обиралась автоматично за допомогою методів машинного навчання. Такий підхід дозволяє зменшити час розробки пов'язаний з вибором оптимальної стратегії керування та підбору необхідних коефіцієнтів.

Наступною розглянутою статтею буде робота тайванських вчених Джангхуй Чейна, Тонг-Янг Хсу та інших [19]. Предметом їхньої роботи був процес аналізу турбулентного факела та використання новітніх методів статистичного аналізу для визначення якісних характеристик горіння. У випадку турбулентного факела світимість та форма факелу мають значні коливання, частота яких не є сталими, тому деякі характеристики, стабільність, наприклад, оцінювались на основі їх мерехтіння. Попередні статистичні моделі оцінки в реальному часі не враховували змінну природу коливань, тож тайванські вчені запропонували новий підхід, що базується на прихованій моделі Маркова та багатосторонньому аналізу основних компонентів факела, тобто регіонів зображення.

Ще одна робота китайських вчених [20] описує схему оптимального спалення в пило-вугільних котлах на основі "енергетичного сигналу випромінювання" ("radiant energy signal" RES). Стратегія управління, викладена в роботі, заснована на імплементації додаткового сигналу RES в контур вторинного повітря. Запропонована система показала результати у вигляді збільшення стабільності процесу горіння та зменшення викидів оксидів азоту. Інші параметри ефективності, на жаль, не наведені.

Як видно з огляду попередніх робіт, більша частина з них розглядає саме методи моніторингу та аналізу інформації, лише припускаючи можливість використання отриманої інформації для процесу регулювання. Незважаючи на те, що можливості матеріально-технічної бази в області фіксації зображення факелу (промислові камери) відносно мало змінювались у своїх можливостях, проте значно змінювались методи аналізу та обробки зображень в реальному часі, що підштовхує дослідження в сфері

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

ідентифікації процесу горіння і сьогодні. Так, у роботі [21], пропонується новий адаптивний алгоритм оцінки краю вогняного фронту факела. Більш точне визначення областей, що відносяться до зображення факела, дозволяє провести аналіз більш репрезентативної вибірки пікселів зображення [25 - 28].

В наведеній роботі саме нові алгоритми обробки зображення дають можливість отримувати більшу кількість інформації, яка необхідна для оцінки, моніторингу та управління, із значно більшою швидкістю.

Робота [22] також розглядає процес моніторингу та оцінки зображення факела використовуючи спектральний аналіз за двома вимірюваними каналами (двома спектральними діапазонами). Для визначення якісних показників процесу горіння використовується мультиваріативний аналіз зображення.

Робота польських дослідників [23] демонструє систему оптимізації за техніко-екологічними показниками спалення пилоподібного палива. Система, що пропонується дослідниками, є двоканальною. Фактично складається з двох контурів регулювання. Швидкого, що базується на системі комп'ютерного зору, та коригувального, на базі газоаналізатора.

Система комп'ютерного зору налаштовується за рахунок спів-ставлення фіксованого камерою зображення у сталих режимах горіння із показниками газоаналізатора, температури.

В роботі порівнюється швидкість реакції традиційних та оптичних систем на зміну якості процесу горіння. Відповідно, традиційні системи мають значно меншу швидкодію, яка зменшується пропорційно розмірам котлоагрегата (відповідно до збільшення відстані від пальника до аналізатора). Результатом використання оптичної системи ідентифікації якості процесу горіння є значне зменшення емісії оксидів азоту та інших продуктів неповного спалення.

Процес подальшого вивчення досліджень за обраним напрямом виявив, що з точки зору апаратної структури, розвиток систем оптичного контролю процесу горіння майже зупинився. На сучасному етапі досліджень, на передній фронт вийшло застосування різних статистичних методів аналізу (особливо зображення турбулентного факела), різних моделей організаційних структур використання даних в регулюванні, використання різних комбінацій параметрів, що можуть бути отримані оптичними та традиційними засобами для регулювання. Відповідно, розгляд цієї частини розвитку засобів регулювання процесу спалення палива доцільно розібрати в окремій праці.

ВИСНОВКИ

Стрімкий розвиток засобів відео-фіксації, обчислювальних можливостей, методів статистичного та функціонального аналізу, інших факторів спричинив можливість утворення та стрімкого розвитку методів та засобів автоматичного контролю процесу спалення в промислових умовах. Починаючи від відносно простих одно-параметричних систем, закінчуючи складними комбінованими чи багато-параметричними системами контролю та управління спалення палива. Різноманітність параметрів, що можуть бути зафіксовані засобами комп'ютерного зору, створює широку варіативність підходів до оптимізації процесу спалення в залежності від специфіки умов та типу палива. Особливо це розширюється великою кількістю алгоритмів обробки та аналізу зображення. Сучасний етап розвитку технологій дозволяє досягти не тільки підвищення техніко-економічних показників, але й значне зменшення рівня екологічних викидів, що створюються котло-агрегатами.

REFERENCE

1. IEA: World Energy Balances, <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-balances>
2. R. Lilja, M. Ollus, R. Sutinen. (1986). Image Processing for the Control of Burning Processes. IFAC Proceedings Volumes. Volume 19, Issue 9, June 1986, Pages 81-88.
3. N. Kurihara, M. Nishikawa, A. Watanabe an others. A Combustion Diagnosis Method for Pulverized Coal Boilers Using Flame-Image Recognition Technology. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. Volume: EC-1, Issue: 2, June 1986. pages: 99-103
4. J. Hirvonen, K. Ikonen. Image Processing in Combustion Management. IFAC Proceedings Volumes. Volume 25, Issue 6, May 1992, Pages 347-350
5. Hitoven J. Lilja R. Ikonen K. Nihtinen J. Image processing in combustion control. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, Vol. 10 No. 2 (1996), Pages 129—137.
6. Mr. D. Popovic, Mr. A. V. Andersin, Mr. A. J. Huttunen, Mr. J. J. Nihtinen. FLAME IMAGE MONITORING AND ANALYSIS IN COMBUSTION MANAGEMENT. COMADEM '97 10th International Congress and Exhibition on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management. Volume 1. June 1997. Pages 145-152.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

7. Alien M. G., Butler C. T, Johnson S. A., Lo E. Y. and Russo F. An imaging neural network combustion control system for utility boiler applications. *Combustion and Flames*. (July 1993) Vol. 94. No. 1. Page: 205-214.
8. Yingping Huang, Yong Yan, Gang Lu and Alan Reed. On-line flicker measurement of gaseous flames by image processing and spectral analysis. *Measurement Science and Technology*, Volume 10, Number 8 (August 1999).
9. G. Lu, Y. Van, Y. Huang and A. Reed. An intelligent vision system for monitoring and control of combustion flames. *Measurement and control*, Volume 32, July 1999. Page: 164-168.
10. Baldini Gaetano, Paola Campadelli, Raffaella Lanzarotti. Combustion analysis by image processing of premixed flames. *Proceedings 2000 International Conference on Image Processing*. 10-13 September 2000
11. Y. Yan, G. Lu, M. Colechin. Monitoring and characterisation of pulverised coal flames using digital imaging techniques. Volume 81, Issue 5, March 2002, Pages 647-655.
12. Gang Lu; Yong Yan; M. Colechin. A digital imaging based multifunctional flame monitoring system. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. Volume: 53, Issue: 4 (August 2004), Page: 1152 - 1158.
13. M. Chimenti, C. Di Natali, G. Mariotti, E. Paganini, G. Pieri, O. Salvetti. An IR image processing approach for characterising combustion instability. *Infrared Physics & Technology*. Volume 46, Issues 1–2, December 2004, Pages 41-47.
14. Huai-Chun Zhou, Chun Lou, Qiang Cheng, Zhiwei Jiang and others. Experimental investigations on visualization of three-dimensional temperature distributions in a large-scale pulverized-coal-fired boiler furnace. *Proceedings of the Combustion Institute*. Volume 30, Issue 1, January 2005, Pages 1699-1706.
15. 15 - G. Szatvanyi, C. Duchesne, and G. Bartolacci. Multivariate Image Analysis of Flames for Product Quality and Combustion Control in Rotary Kilns. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. Vol. 45 (2006). No. 13. P.:4706–4715.
16. Myriam Cousineau-Pelletier, Carl Duchesne, Donald F McCabe. Monitoring and control of biomass boilers using multivariate image analysis. [Електронний ресурс] Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/268351668_MONITORING_AND_CONTROL_OF_BIOMASS_BOILERS_USING_MULTIVARIATE_IMAGE_ANALYSIS
17. Hua-Wei Huang and Yang Zhang. Flame colour characterization in the visible and infrared spectrum using a digital camera and image processing. *Measurement Science and Technology*. June 2008. Vol. 19(8):085406.
18. Erik Schaffernicht1, Volker Stephan, Klaus Debes, Horst-Michael Gross. 32nd Annual German Conference on AI, Paderborn, Germany, September 15-18, 2009, Proceedings. / KI 2009: Advances in Artificial Intelligence pp 395–402.
19. 19 - Junghui Chen, Tong-Yang Hsu, Chih-Chien Chen, Yi-Cheng Cheng. Monitoring combustion systems using HMM probabilistic reasoning in dynamic flame images. *Applied Energy*. Vol. 87, Issue 7, July 2010, Pages 2169-2179.
20. Benyuan Huang, Zixue Luo, Huaichun Zhou. Optimization of combustion based on introducing radiant energy signal in pulverized coal-fired boiler. *Fuel Processing Technology*. Volume 91, Issue 6, June 2010, Pages 660-668.
21. T. Qiu, Y. Yan and G. Lu, "An Autoadaptive Edge-Detection Algorithm for Flame and Fire Image Processing," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 61, no. 5, pp. 1486-1493, May 2012, doi: 10.1109/TIM.2011.2175833.
22. David Castiñeira, Blake C. Rawlings, and Thomas F. Edgar. Multivariate Image Analysis (MIA) for Industrial Flare Combustion Control. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. Vol. - 51 (May 2012), Is. - 39, P. 12642–12652.
23. Waldemar Wójcik, Konrad Gromaszek, Andrzej Kotyra, Tomasz Lawicki. Pulverized coal combustion boiler efficient control. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review)*, ISSN 0033-2097, R. 88 NR 11b/2012, Page: 316-319.
24. W. Wójcik, A. Kotyra, A. Smolarz и C. Wojciechowski, «Application of wavelet transformation for analysis of measurements in fibre optic flame monitoring system,» *Proceedings of SPIE*, V. 4239, pp. 96–101, 2000.
25. W. Wójcik, T. Biegański, A. Kotyra и A. Smolarz, «Forecasting of changes of flame flickering in coal flame burner,» *Proceeding of SPIE*, 3189, pp. 100–109, 1997.
26. W. Wójcik, A. Smolarz, A. Kotyra, C. Wojciechowski и P. Komada, «Optimisation of optical fibre probe for flame monitoring by application of finite elements method,» в *Proceedings on 2-nd International Symposium on "Microelectronics Technologies and Microsystems"*, Lviv, 1998.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

27. W. Wójcik, «The utilisation of flame flicker in the fiber-optic system for combustion quality,» в EUROSENSORS IX, Warsaw, 1997. [151] A. Smolarz, W. Wójcik, J. Ballester, R. Hernandez, A. Sanz и T. Golec, «Fuzzy controller for a lean premixed burner,» *Przeegląd Elektrotechniczny*, № 7/2010, pp. 287–289, 2010.
28. W. Wójcik, M. Kalita, T. Golec и A. Smolarz, «Zastosowanie algorytmów koewolucyjnych do modelowania wybranych parametrów palnika energetycznego,» *Przeegląd Elektrotechniczny*, № 7/2010, pp. 244–246, 2010.

Надійшла до редакції 25.02.2023 р.

АРЗІКУЛОВ ТИМУР – аспірант кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
e-mail: t.arzikulov@kpi.ua

БАГАН ТАРАС ГРИГОРОВИЧ – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», *e-mail: mtbagan@ukr.net*

Timur ARZIKULOV, Taras BAHAN

**THE EMERGENCE AND DEVELOPMENT OF THE COMBUSTION PROCESS
MANAGEMENT SYSTEM BASED ON COMPUTER VISION AND IMAGE PROCESSING**

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv