

УДК 536.46

Т. С. АРЗІКУЛОВ, Т. Г. БАГАН

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОДИНОЧНОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ГАЗОВОГО ФАКЕЛУ ЗАСОБАМИ Й МЕТОДАМИ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ В ІМІТАЦІЙНІЙ УСТАНОВЦІ ТОПКИ КОТЛОАГРЕГАТА

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського, Україна, e-mail: t.arzikulov@kpi.ua

Анотація. Питання оптимізації процесу спалення є досить актуальним для сучасної теплової енергетики й постає ще більше у контексті відновлення та перебудови енергетичної інфраструктури України. Використання засобів комп'ютерного зору дозволить напряму визначати якісні характеристики процесу спалення газів в реальному часі не опираючись на вимірювання вторинних параметрів, зміна значень яких є досить інерційною. Сам процес горіння турбулентного факелу, який зустрічається в промислових котлоагрегатах, є маловивченим й не дозволяє заздалегідь виконати його моделювання. Тому важливим етапом побудови будь-якої системи контролю та керування є ідентифікація об'єкту за рахунок проведення експериментальних замірів, на основі яких будуть визначені параметри та форми залежностей для отримання математичної моделі процесу. В ході поточної роботи розглядається процес ідентифікації процесу горіння метанового факелу всередині імітаційної установки топки котлоагрегата (камери спалення). За результатами проведення серії експериментів, вдалося отримати залежності характеристик візуального прояву процесу горіння, що фіксується відеокамерою, від його поточного режиму горіння, що визначається задоволеністю стехіометричного співвідношення подачі газу й повітря в пальник з попереднім змішуванням газоповітряної суміші. Загалом, отримані залежності спектрального складу випромінювання, площі факела та його світимості від режиму горіння. Залежності характеризуються суттєвою нелінійністю при переході факела в режим значного хімічного недопалу, проте з легкістю піддаються лінеаризації в зоні інтересу, що розташована біля точки задоволення стехіометричного співвідношення. Результати цієї статті демонструють придатність параметрів, які отримуються засобами комп'ютерного зору, для їх використання в традиційних системах керування. Враховуючи швидкість отримання таких даних, можемо зробити висновок про доцільність створення системи керування, що опирається на параметри горіння, повністю отриманих методами та засобами комп'ютерного зору.

Ключові слова: енергетика, горіння, оптимізація, комп'ютерний зір, ідентифікація об'єкта.

Abstract. The issue of optimizing the combustion process is quite relevant for modern thermal power engineering and arises even more in the context of the restoration and reconstruction of the energy infrastructure of Ukraine. The use of computer vision tools will allow directly determining the qualitative characteristics of the gas combustion process in real time without relying on measurements of secondary parameters, the change in values of which is quite inertial. The process of turbulent torch combustion itself, which occurs in industrial boiler units, is poorly studied and does not allow for its modeling in advance. Therefore, an important stage in the construction of any control and management system is the identification of the object by conducting experimental measurements, on the basis of which the parameters and forms of dependencies will be determined to obtain a mathematical model of the process. In the course of the current work, the process of identifying the methane torch combustion process inside the simulated installation of the boiler unit furnace (combustion chamber) is considered. According to the results of a series of experiments, it was possible to obtain the dependences of the characteristics of the visual manifestation of the combustion process, recorded by a video camera, on its current combustion mode, which was determined by the satisfaction of the stoichiometric ratio of gas and air supply to the burner with preliminary mixing of the gas-air mixture. In general, the dependences of the spectral composition of the radiation, the area of the torch and its luminosity on the combustion mode were obtained.

The dependences are characterized by significant nonlinearity when the torch transitions to the mode of significant chemical underburning, but are easily linearized in the area of interest, which is located near the point of satisfaction of the stoichiometric ratio. The results of this article demonstrate the suitability of the parameters obtained by computer vision for their use in traditional control systems. Taking into account the speed of obtaining such data, we can conclude that it is appropriate to create a control system based on combustion parameters completely obtained by computer vision methods and means.

Keywords: energy, combustion, optimization, computer vision, object identification.

DOI: 10.31649/1681-7893-2024-48-2-249-260

ВСТУП

Використання засобів комп'ютерного зору для дослідження явища спалення є досить об'ємним розділом науки, що вивчає як сам процес спалення палива різних видів, так і методи аналізу інформації у вигляді фото/відео-ряду зображення процесу спалення чи горіння за різних умов. Саме горіння, в залежності від умов в якому воно проходить, та цілей, що стоять перед системами комп'ютерного зору, потребує кардинально різних підходів.

Такі задачі як: визначення характеристик палива в умовах лабораторного аналізу, виявлення джерел горіння на складському приміщенні, виявлення зон горіння на колосниковій решітці в середині котла, аналіз процесу спалення палива в котлоагрегаті – це абсолютно різні завдання, що вимагають різного обладнання та підходу до виявлення та ідентифікації горіння.

В статті [1] було розглянуто етапи становлення напряму використання засобів комп'ютерного зору в системах ідентифікації та аналізу процесу спалення, використання отриманої інформації в системах керування котлоагрегатами. Стаття [2] розглядає тенденції до застосування сучасних методів для збільшення ефективності й зменшення викидів теплової енергетики.

Ціллю цієї статті є демонстрація результатів аналізу даних отриманих в процесі фізичного експерименту зі спалення газу в різних режимах. Виявлення наявних залежностей між параметрами візуального прояву горіння та його режимом протікання, які можуть бути використані в системах керування.

Зважаючи на поставлену мету використання отриманих даних в системах автоматичного керування в реальному часі, виникають певні вимоги до процесу аналізу, такі як швидкість отримання й обробки, простота та однозначність отриманих результатів. Відповідно до цього шукались найпростіші методи отримання релевантної інформації.

ОСТАННІ ДОСЯГНЕННЯ В ОБЛАСТІ

Аналіз останніх досліджень. На сьогодні, процес ідентифікації полум'я за допомогою засобів комп'ютерного зору широко досліджується зарубіжними вченими з Великої Британії, Південної Кореї, Китаю та інших країн. Так, в [3] розглядається використання засобів комп'ютерного зору для побудови моделі пропанового факелу. Хоча робота не направлена на дослідження факелу в промислових умовах, проте є досить цікавою для поточного дослідження, адже структурно, установка, що використовувалась для експерименту, досить схожа на модель топки котлоагрегата, яка використана в поточному дослідженні.

В дослідженні [3] наочно приведено зображення залежності геометричного розміру факела та його форми від режиму згорання. Рисунок з дослідження приведений на рисунку 1.

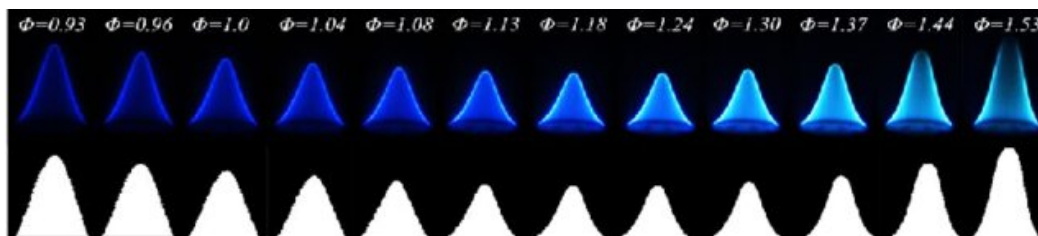


Рисунок 1 – Залежність геометричних параметрів факелу пропану від якості згорання

Досить детально питання використання засобів комп'ютерного зору для ідентифікації газового факела розглянуто в роботі [4], де наведені певні методи, що можуть бути використані для отримання інформацію про якість спалення вуглеводнів (газів) методами комп'ютерного зору.

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ

Крім роботи [3], що вивчала залежність форми пропанового факела від співвідношення кисень/паливо, яка визначалась в лабораторних умовах і з невеликими об'ємами згорання, релевантні дослідження описані у таких роботах: [5] – дослідження залежності видимого спектру факелу попередньо-змішаної газо-повітряної суміші в циліндричному перфорованому пальнику в конденсаційному котлі; [6] – створення системи визначення якості спалення розпиленого мазуту в котлі на основі засобів обробки зображення й нейронних мереж; [7,8,9,10] – вивчає питання зменшення викидів твердих часток та продуктів недопалу в утилізаційному котлі за допомогою методів комп'ютерного зору.

Ці роботи стосувались вирішення чітко-визначених завдань, які хоча й релевантні до теми дослідження, проте мають певну специфіку, яка не дозволяє використовувати ті методи, що описані в статтях для газових котлів з моно-пальниками, або із деякою кількістю відокремлених пальників, що регулюються окремо.

ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТУ

Основними завданнями експерименту є отримання набору зображень газового факелу в різних режимах горіння при різній потужності спалення. Відпрацювання алгоритмів відділення факелу від фону та встановлення залежностей між візуальними проявами факела та його якісними показниками.

Нижче наведено структуру експериментальної установки (рис. 2). Варто зазначити, що є певна схожість із установкою, використаною в статті [3]. Відмінності між ними продиктовані більшою потужністю досліджуваного пальника, відмінним видом палива та вибраними засобами вимірювання.

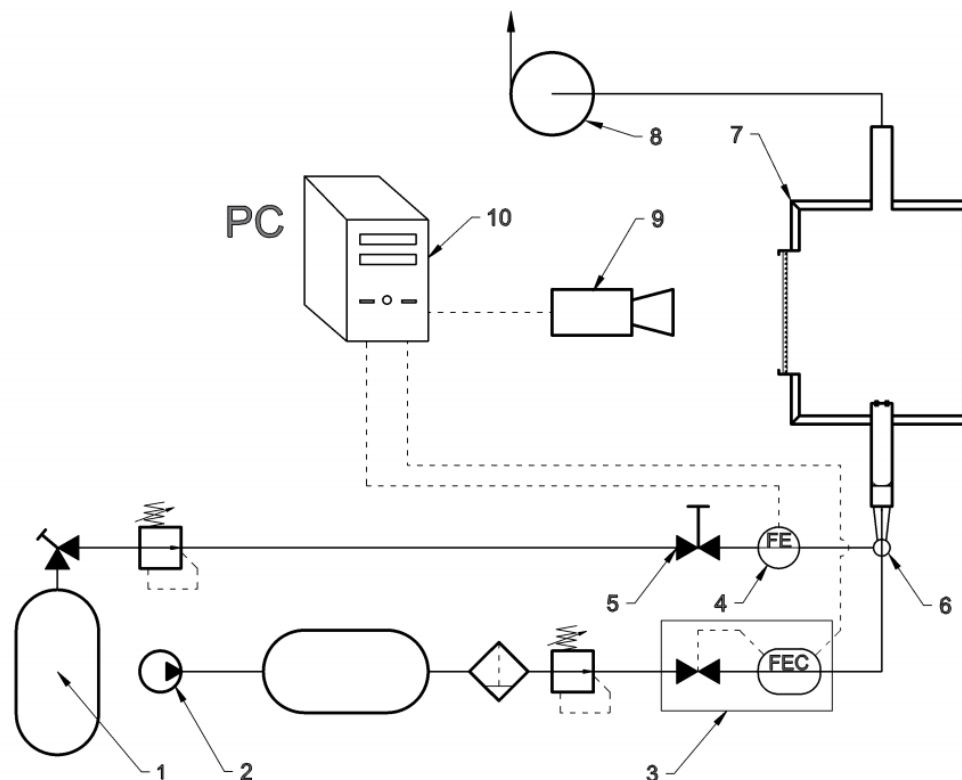


Рисунок 2 – Структура випробувального стенду:

- 1 – Метановий балон; 2 – компресор з ресивером; 3 – Витратомір-регулятор SFC5500-200slm; 4 – витратомір SFM550-10slm; 5 – регулюючий вентиль подачі газу; 6 – Ежектор з камерою змішування; 7 – камера спалення із оглядовим вікном; 8 – димосмок; 9 – камера; 10 – Станція обробки даних

Як видно з рисунку 2, паливо зберігається в метановому балоні високого тиску й подається в систему через подвійний редуктор, що дозволяє зменшити тиск спершу до діапазону середнього тиску, після до діапазону низького тиску, що й використовується в установці. Повітря подається за допомогою

СИСТЕМИ ТА ПРИСТРОЇ ВІДОБРАЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ

компресора й проходить через осушувач з маслофільтром та редуктором тиску, що забезпечує стабільний тиск стисненого повітря в мережі. Подача метану фіксується термо-масо-витратоміром SFM-5500 10slm й регулюється ручним регулюючим клапаном, що встановлений перед ним. Подача повітря фіксується та регулюється відповідно до уставки термо-масо-витратоміром SFC-5500 200slm, який оснащений функцією регулювання витрати за заданою уставкою.

Використання цих вимірювальних засобів із можливою похибкою у 0,4% витрати по метану та 0,08% по повітрю дозволяє отримати досить релевантні дані про поточний режим горіння факелу, адже камера спалення, де відбувається процес горіння сконструйована таким чином, що надходження надлишкового повітря опускається до рівня, яким можна знехтувати.

Газ та повітря подаються в камеру спалення через ежектор і камеру змішування, яка оснащена завихрювачем, що сприяє рівномірному перемішуванню газо-повітряної суміші. На своєму протилежному від ежектора кінці – камера змішування оснащена соплом, через яку газо-повітряна суміш виходить у камеру спалення, що викладена в середині шамотною цеглою з ціллю імітації середовища в середині реальних котлів.

Підпал відбувається вручну. Димові гази усуваються із камери спалення через димосмок.

Для отримання відеоряду процесу горіння використовується цифрова кольорова відеокамера із роздільною здатністю 200 Мп, що дозволяє отримати зображення в якості 4К частотою 30 кадрів/с.

Зйомка відео-ряду відбувалась в усталених режимах горіння, які визначались методом задання співвідношення подачі газу й повітря. Відповідно до різної усталеної подачі газу, задавалась подача повітря у співвідношенні від 0,7 до 1,1 подачі повітря від необхідного для досягнення стохіометричного співвідношення.

Отримання відеоряду відбувалось за однакових налаштувань відеокамери із фіксованим фокусом та експозицією. Протягом зйомки відеоряду, що буде підданий аналізу далі, камера знаходилась в однаковій позиції відносно камери спалення. Застосовувались світлові бар'єри для усунення можливих відблисків від навколишнього середовища та освітлення, що могли б спотворити отримане зображення. Загалом, було проведено декілька експериментів отримання відеоданих, при різних положеннях камери та її налаштуваннях для отримання інформації про вплив зміни положення та налаштування камери.

Загалом, зміна її місця розташування відносно факелу (відстань, кут) мають значний вплив на кількісну оцінку одних й тих самих критеріїв при усталених режимах, але не змінюють загальних тенденцій їх зміни при переході з одного стану в інший. Зміна ж налаштувань камери, таких як фокус, баланс білого, експозиція – значно спотворює отримані дані, особливо, що стосується аналізу кольорового спектру.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Виділення зон інтересу

Для аналізу процесу спалення палива на конкретному пальнику, перш за все – необхідно виділити зображення самого полум'я з загального потоку відео-даних. Оскільки положення пальника та відеокамери незмінне, горіння відбувається в одній й тій самій зоні, що дозволяє досить просто зменшити кількість масиву даних, що необхідно обробляти, шляхом виокремлення матриці зони спалення із загального кадру.

Другою задачею, є виділення зображення полум'я від фону. За умови повністю чорного фону, звісно така задача є досить простою, проте в існуючих котлоагрегатах використовується або захисне футування шамотною цеглою (чи іншими жаростійкими матеріалами), що має світлий колір, або водяна сорочка, що складається з мідних труб, які йдуть до барабану котла. Таким чином, задача виділення зображення полум'я ускладнюється.

Зважаючи на одноманітність фону, а також на те, що в топці котлоагрегату єдиним джерелом світла є сам факел, відповідно, яскравість фону, який відбиває світло, буде значно менше за яскравість самого факела. Тому, вважаємо, в цьому конкретному випадку, недоречним використання досить вимогливих до розробки засобів на основі нейронних мереж.

Звичайна фільтрація зони інтересу за показником світимості дозволяє отримати наступні результати (рис. 3):

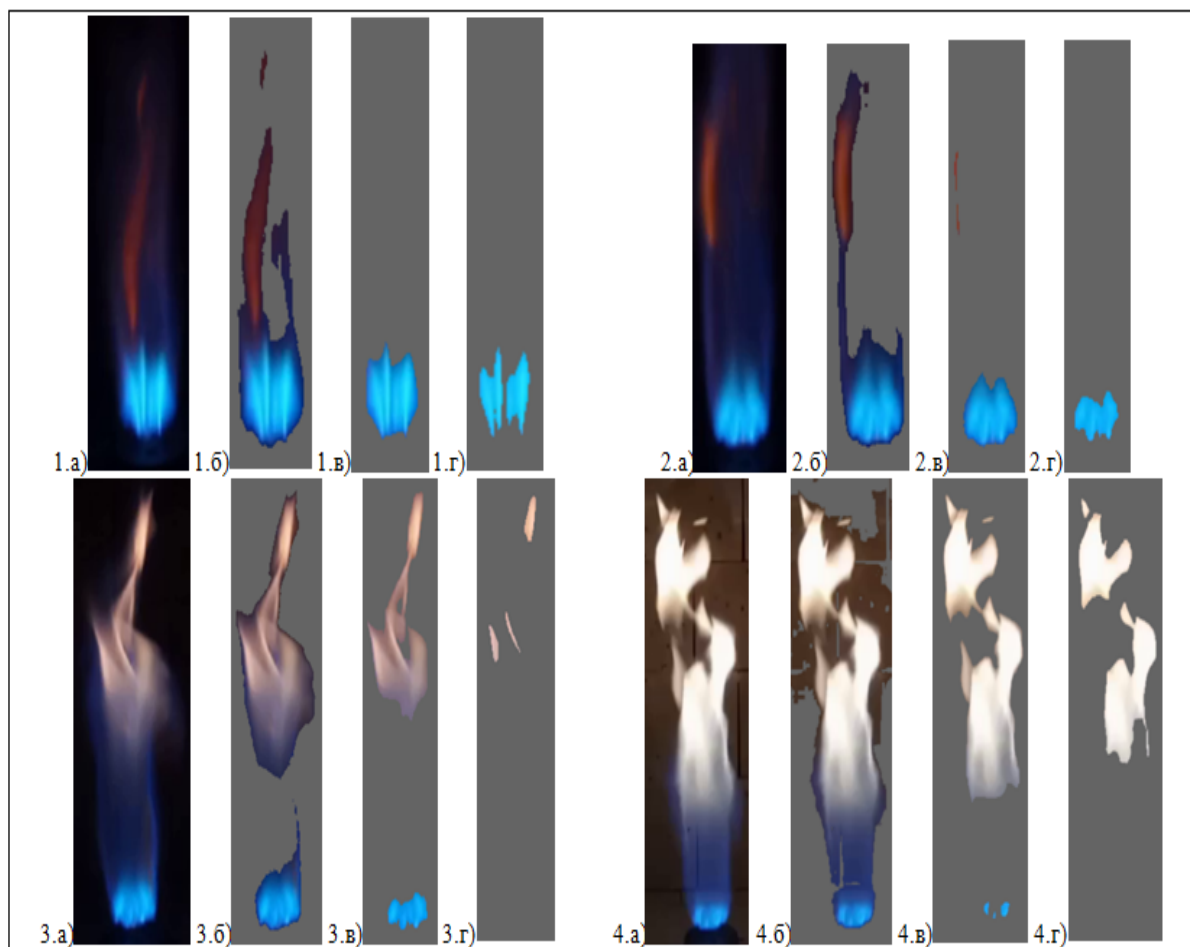


Рисунок 3 – Результати фільтрації зображення факелу при різних якісних режимах горіння(1-4) та різних порогах фільтрації (а - г) відносно найяскравішої точки на кадрі
 Використані пороги фільтрації: а - 0; б - 0,2; в - 0,5; г - 0,8.

Кадри, що використовувались на рисунку 3, отримані при однаковій витраті газу, проте в різних режимах горіння, що наочно демонструють різницю світимості факела в умовах малого та великого хімічного недопалу.

Як видно з наведених зображень, у випадку яскраво-вираженого хімічного недопалу, значно зростає світимість факела. Настільки, що при малому значенні порогу фільтрації стає неможливим повне відділення фону від зображення самого факела. Використання більш високих порогів усуває цю проблему. Крім безпосереднього відділення фону відбувається виділення тих областей факела, що містять найбільшу щільність випромінювання. На рисунку 3, зображення 4.б в достатній мірі демонструє вплив світловідбиваючих властивостей фону на процес фільтрації у зонах низької концентрації спалюваних частинок.

Додатковою можливістю, що надає така фільтрація – є можливість використання графіків розподілу зон випромінювання. Нижче наведені зображення із декількома варіантами розташування зон світимості на яких можна наочно побачити зміну розподілу розташування зон інтенсивного випромінювання, а також перерозподілу їх при вході в режим хімічного недопалу, яке можна зобразити у вигляді гістограм розподілу (рис. 4).

Як видно з рисунку 4, при переході в режим неповного згорання відбувається значний перерозподіл зон найбільшої яскравості зображення. Поява «зайвої» зони аналізу у верхній частині факела, свідчить про появу тенденцій до недопалу газу, який подається в камеру спалення. Відповідно, поява додаткових осередків світимості, крім зони безпосередньо біля сопла, є одним з найочевидніших індикаторів виникнення хімічного недопалу.

Отримання й оцінка якісних характеристик

Для оцінки якісних характеристик був створений Python-скрипт на основі бібліотеки OpenCV, що дозволило отримати такі значення як:

- середня площа області інтересу;
- середня світимість області інтересу;
- середня інтенсивність випромінювання в кожній області видимого спектру (RGB).

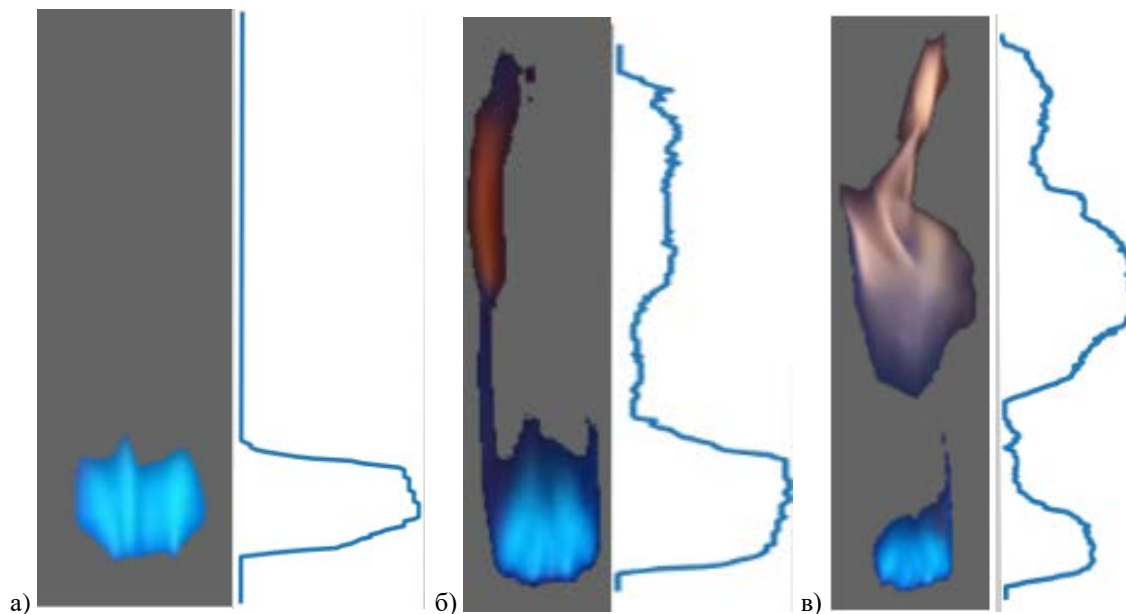


Рисунок 4 – Графіки розподілу зон інтересу, виділених на основі світимості

Для аналізу виконувались обрахунки зразків відеоряду, що відповідали стабільним режимам роботи факелу, тривалістю в 1 секунду. Отримані дані усереднювались, у зв'язку з турбулентною природою факелу та його коливаннями.

Наочну залежність, при аналізі інформації, між режимом горіння факелу, що визначався пропорцією подачі повітря й газу, виявили такі показники як площа зони інтересу й світимість області інтересу. Аналіз на основі кольорового спектру, хоча показав певні результати, проте очевидних результатів не дав з наступних причин: зміна режиму горіння супроводжується зміною світимості, а отже і порушенням світлосприйняття при сталих налаштуваннях експозиції камери. В свою чергу – динамічна зміна цих налаштувань спотворює дані по зміні площі та світимості. Відповідно, виконувати аналіз одночасно за показниками площі, світимості та кольоровому спектру не було можливим з наявним обладнанням.

Одним з варіантів вирішення цієї проблеми є отримання відеоряду у форматі RAW із подальшою його обробкою, проте виконання таких операцій вимагатиме значно вищої кількості обрахунків і потужностей обчислювального модуля. Другим варіантом є захоплення відеоряду камерою з більшим діапазоном світлосприйняття, що, можливо, можна досягти використанням нейтрально-сірого світлофільтра.

Залежність площі та світимості від режиму горіння

Виявлену залежність представимо у вигляді графіків. Спершу розглянемо залежність площі зони інтересу від режиму горіння (Рисунок 5).

Графіки складені відносно до ступеню задоволення стохеометричного співвідношення у відсотках. Оскільки фіксована площа факелу залежить не лише від його режиму, але й від розташування камери відносно нього, графіки наведені у відносних одиницях без прив'язки до абсолютних значень.

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ

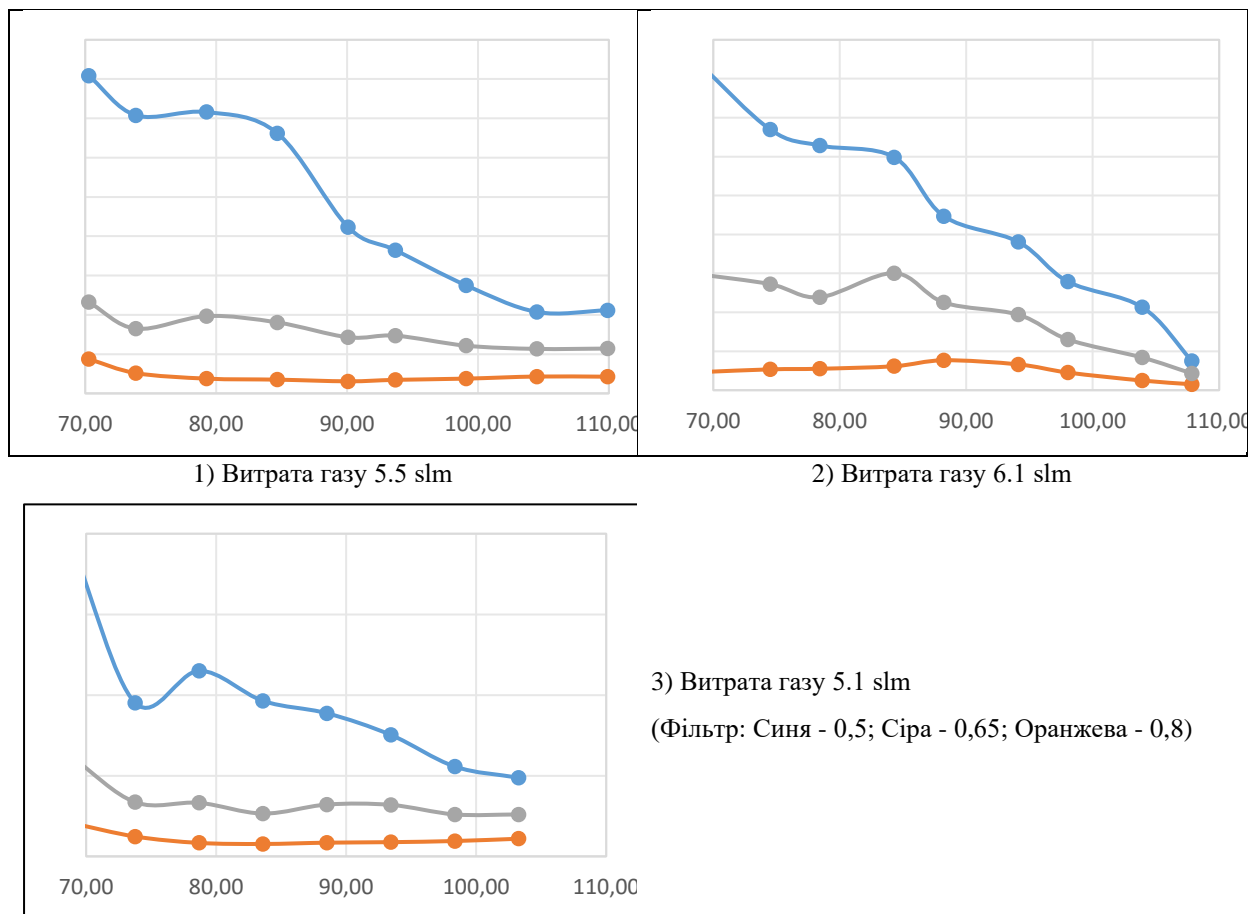


Рисунок 5 – Відображення залежності площі області інтересу факела при різних значеннях фільтрації та режимах горіння.

З наведених графіків чудово можна побачити, що високе значення фільтра має значний вплив на фіксацію площі зони інтересу, тобто зони з найбільшою щільністю випромінювання. Проте на фіксацію зміни світимості, зони інтересу – значення фільтра майже не впливає, що видно з Рисунку 6:

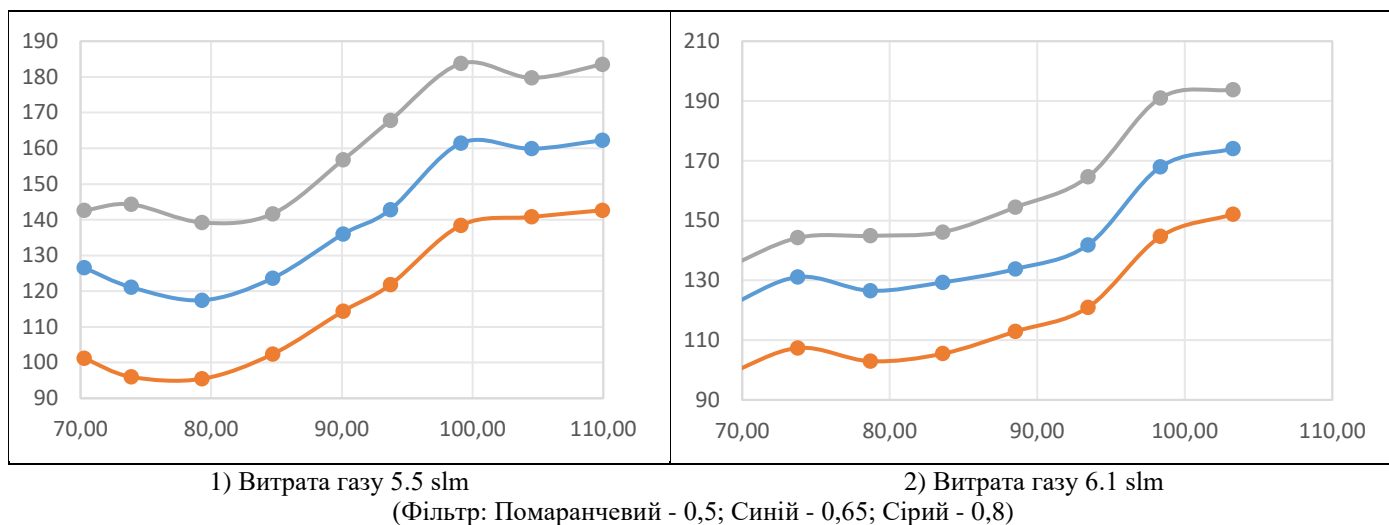


Рисунок 6 – Відображення залежності світимості області інтересу факела від його режиму горіння.

СИСТЕМИ ТА ПРИСТРОЇ ВІДОБРАЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ

З графіку світимості чітко видно, що форма залежності залишається майже незмінною при різних значеннях фільтру, проте відбувається його зміщення в сторону більшої яскравості за рахунок відсікання більш темних ділянок при високих значеннях фільтрації.

На усіх графіках можемо спостерігати наявність очевидної залежності між такими характеристиками як площа та світимість факела і його режимом горіння.

Також необхідно розглянути залежність між світимістю та площею факела.

На рисунку 7 приведені графіки, отримані шляхом обробки більшої кількості кадрів при сталій витраті газу та різних режимах горіння. Отримані графіки яскраво демонструють плавність зміни та взаємозалежність параметрів світимості і площі. Додатково слід звернути увагу на певні особливості, які можна помітити на графіках 7.1 та 7.4. Як видно, на початку кривої можна спостерігати спад яскравості при малій площі факелу. Згідно графіків наведених на рисунках 5 та 6, очевидно, що при збільшенні кількості повітря, що подається до пальника – площа факелу зменшується, проте зростає світимість.

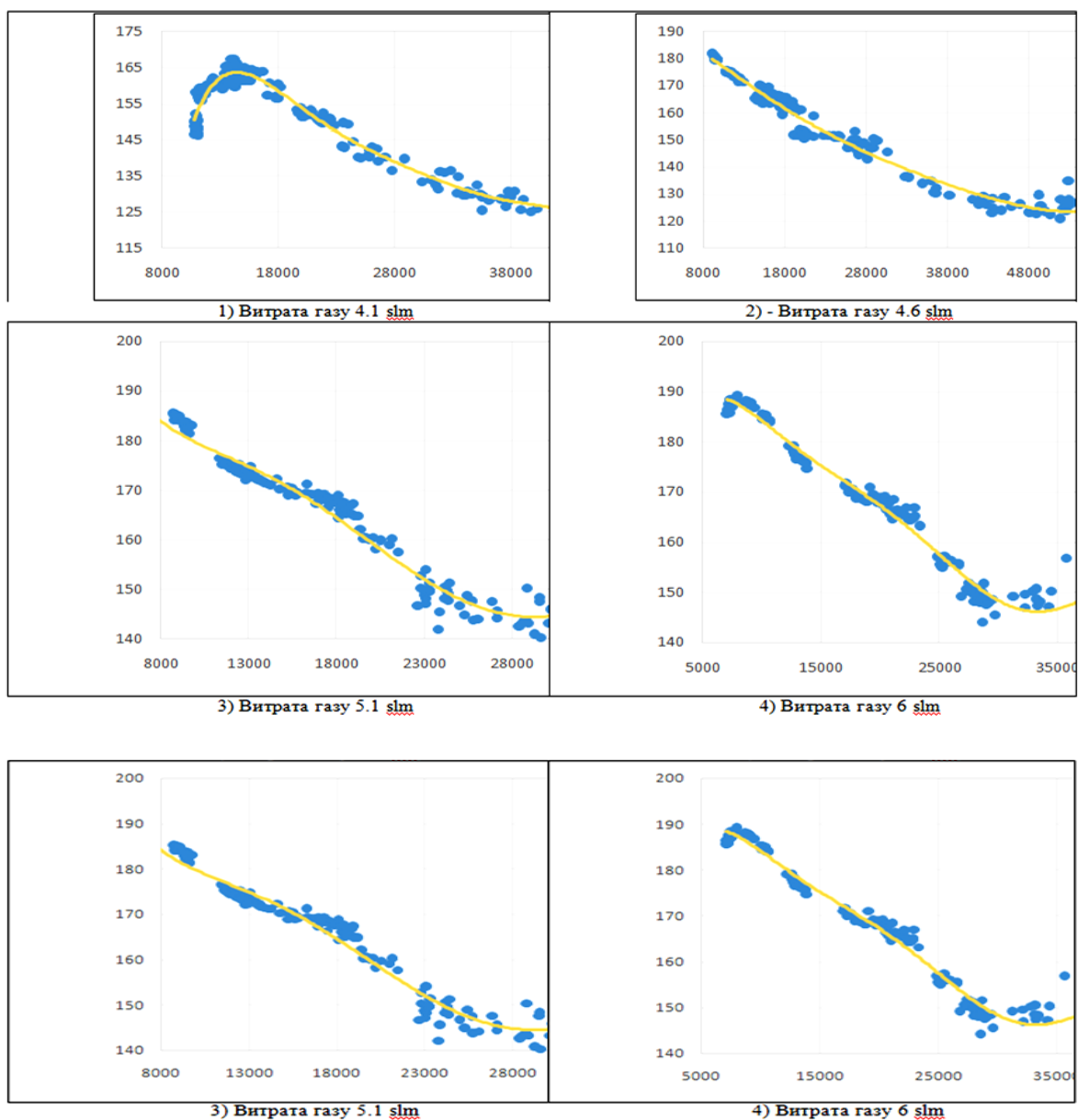


Рисунок 7 – Відображення залежності світимості від площі факелу за різних витрат газу

Ця тенденція вірна лише до моменту досягнення стохеометричного співвідношення газоповітряної суміші, далі графік втрачає свою лінійність. Пояснюється це досить звичайним явищем надлишку повітря, яке розмиває фронт факелу. Додатково, на графіках можна спостерігати зростання

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ

розкиду точок при збільшенні його площі, що характерно для переходу факелу в режим значного хімічного недопалу, який характеризується різким зростанням світимості та переходом випромінювання у червоний спектр, а також, значним зменшенням стабільності факелу.

Розглянувши окремі графіки залежності світимості від площі факелу (його області найактивнішого випромінювання), звернемо увагу на загальну картину, що представлена на рисунку 8.

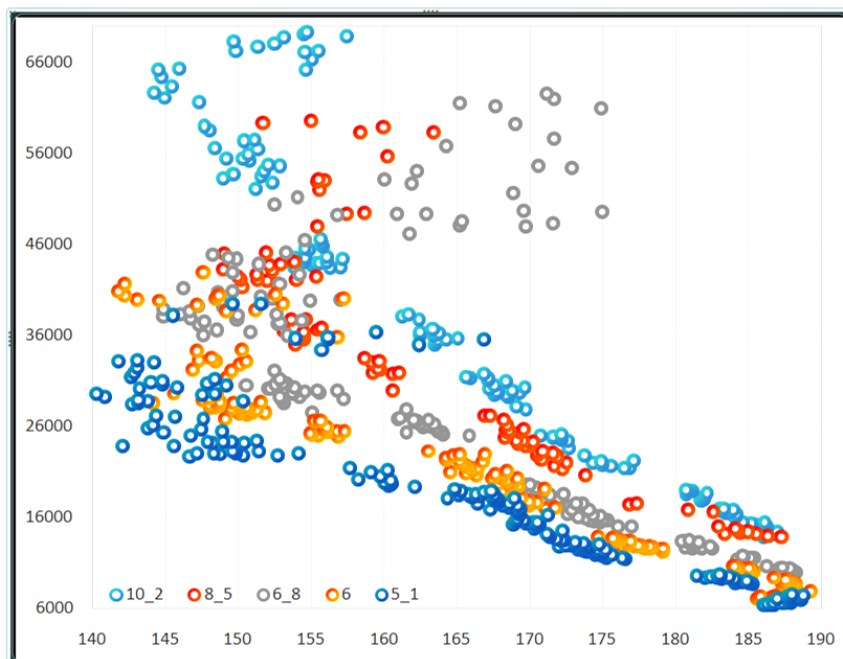


Рисунок 8 – Загальна залежність площі факелу від світимості при різних витратах газу

З рисунку 8 чудово видно, що загальні тенденції залежностей мають однакову форму, проте зміщені по площі факелу відповідно до витрат палива.

З огляду на вищенаведений графік, можемо припустити, що на ділянці лінійного спадання площі факелу при збільшенні світимості, значення світимості досить точно відображають режим горіння палива. Відповідно до цього, розглянемо графік залежності зміни площі факелу в однакових режимах горіння (однакова світимість зони інтересу на лінійному відрізку графіка) від витрати газу (Рисунок 9).

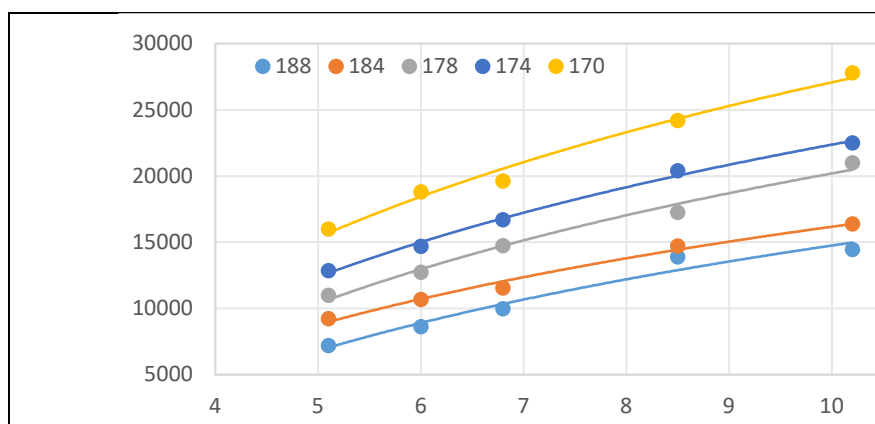


Рисунок 9 – Залежність площі факелу від витрати газу, при однаковій світимості

Як можна впевнитись, залежність є практично лінійною, що, зважаючи на вищенаведені залежності дає можливість використати отримані дані для синтезу регулятора і їх використання в реальних системах керування.

Залежності кольорового спектру

СИСТЕМИ ТА ПРИСТРОЇ ВІДОБРАЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ

Фіксація залежності режиму спалення газу від кольорового спектру виконувалась тією самою камерою з використанням динамічної експозиції, що дозволило уникнути засвічування зображення проте значно спотворило фіксацію площі факелу.

На рисунку 10 наведено графіки залежності спектрального випромінювання, що фіксувалось камерою.

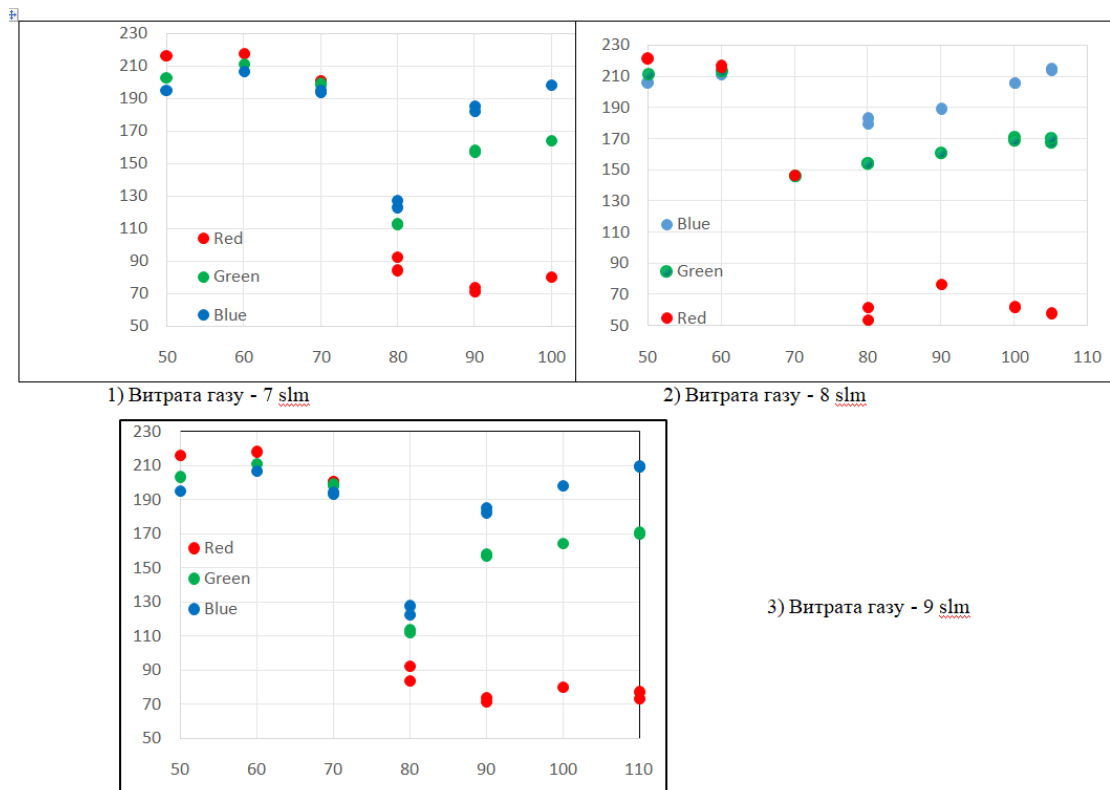


Рисунок 10 – Відображення залежності випромінювання кольорового спектру пропанового факела від режиму горіння

Розглянувши наведені графіки, легко помітити чітко виражену нелінійність показів. Однак, в зоні задоволення стохеометричного співвідношення (80-

%) спостерігаємо параболічне зростання випромінювання в синьому спектрі й відносно сталі значення випромінювання в червоному спектрі. В зоні значного хімічного недопалу – спостерігається стрибкоподібне зростання світимості із переважанням червоного спектру випромінювання, що дозволяє легко відділити ці два режими один від одного.

ВИСНОВКИ

З огляду на результати дослідження, можна з впевненістю казати про придатність засобів комп'ютерного зору для отримання інформації про якісний стан процесу горіння та ідентифікації його режимів. Незважаючи на загальний нелінійний вигляд приведених залежностей, на цільовому діапазоні вони цілком підлягають лінеаризації, вихід же за межі цільового діапазону, легко індукується.

Найпростішим для використання в системі автоматичного керування вбачається крива залежності світимості від площі факелу, яка є лінійною на цільовому діапазоні й має відносно лінійну залежність з витратою газу.

Значення показників випромінювання в кольоровому спектрі не залежить від витрати газу (на певному діапазоні), проте їх застосування вимагатиме наявності більш коштовних відеокамер для уникнення явища засвічування сенсора.

Використання обох характеристик разом хоч і підвищуватиме надійність системи, однак буде потребувати більше потужності для виконання обчислень.

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ

Загалом варто зазначити, що система, заснована на аналізі оптичних характеристик випромінювання факела, буде дуже чутлива до заміни камери, зміну її налаштувань та навіть зміщення камери під кутом відносно факелу й зміни відстані між камерою й факелом.

Таким чином, створення подібної системи для кожного конкретного котлоагрегату вимагатиме виконання її калібрування на основі стандартних методів аналізу якості процесу. Незважаючи на це – калібрування системи може виконуватись при пусконаладжувальних роботах, сервісному обслуговуванні з заміни елементів системи захоплення зображення (камери, оптики і т.п.), періодичному калібруванні для визначення відхилень в роботі системи. Тим самим це дає змогу розмноження системи на велику кількість установок із використанням переносних засобів калібрування, які є досить дорогі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Арзікулов Т. С., Баган Т. Г. (2023). Аналіз систем керування процесами горіння на основі засобів комп'ютерного зору та обробки зображень. Оптико-електронні інформаційно енергетичні технології. 45, №1, 55-63.
2. Mohammadi K., Immonen J., Blackburn L. D., Tuttle J. F., Andersson K., Powell K. M. (2022). A review on the application of machine learning for combustion in power generation applications. 39, №6, p. 1027-1059.
3. Hao Yang, Yufeng Lai, Xuanqi Liu, and others. (2023). Equivalence Ratio Modelling of Premixed Propane Flame by Multiple Linear Regression Using Flame Color and Spatial Characteristics. MEASUREMENT SCIENCE REVIEW, 23, No. 1, 40-46.
4. Hao Yang, Yuwen Fu, Jiansheng Yang. (2022). Review of Measurement Techniques of Hydrocarbon Flame Equivalence Ratio and Applications of Machine Learning. MEASUREMENT SCIENCE REVIEW, 22, No. 3, 122-135.
5. Mahdi Najarnikoo, Mohammad Zabetian Targhi, Hadi Pasdarsahri. Experimental study on the flame stability and color characterization of cylindrical premixed perforated burner of condensing boiler by image processing method. Energy: Volume 189, 15 December 2019.
6. Chang-Min Lee. Combustion Control of Ship's Oil-Fired Boilers based on Prediction of Flame Images. Journal of Marine Science and Engineering, Volume 12, Issue 9 (September 2024).
7. Samantaray B.B. and Mohanta C.K.. (Dec. 2015). Analysis of industrial flame characteristics and constancy study using image processing technique, J. Mech. Eng. Sci., vol. 9, pp. 1604–1613.
8. Wójcik W., Kotyra A., Golec T. (2006). Combustion assesment of coal and biomass mixtures using image processing,» в Symposium on Photonics Technologies for Framework Programme 7 OPERA, Wrocław,
9. Wójcik W., Kotyra A., Komada P., (2005). Biomass combustion monitoring using fibre-optic probe, IV International Conference New Electrical and Electronic Technologies and Their Application, Zakopane,
10. Kotyra A., Wójcik W., Golec T., Komada P. (2007). Assesment of flame stability based on its image features,» Proceeding of SPIE, Lightguides and Their Applications, т. 6608, p. 283–287.

REFERENCES

1. Arzikulov T. S., Bagan T. G. (2023). Analysis of combustion process control systems based on computer vision and image processing. Optical-electronic information and energy technologies. 45, No. 1, 55-63.
2. Mohammadi K., Immonen J., Blackburn L. D., Tuttle J. F., Andersson K., Powell K. M. (2022). A review on the application of machine learning for combustion in power generation applications. 39, №6, p. 1027-1059.
3. Hao Yang, Yufeng Lai, Xuanqi Liu, and others. (2023). Equivalence Ratio Modelling of Premixed Propane Flame by Multiple Linear Regression Using Flame Color and Spatial Characteristics. MEASUREMENT SCIENCE REVIEW, 23, No. 1, 40-46.
4. Hao Yang, Yuwen Fu, Jiansheng Yang. (2022). Review of Measurement Techniques of Hydrocarbon Flame Equivalence Ratio and Applications of Machine Learning. MEASUREMENT SCIENCE REVIEW, 22, No. 3, 122-135.

5. Mahdi Najarnikoo, Mohammad Zabetian Targhi, Hadi Pasharshahri. Experimental study on the flame stability and color characterization of cylindrical premixed perforated burner of condensing boiler by image processing method. *Energy*: Volume 189, 15 December 2019.
6. Chang-Min Lee. Combustion Control of Ship's Oil-Fired Boilers based on Prediction of Flame Images. *Journal of Marine Science and Engineering*, Volume 12, Issue 9 (September 2024).
7. Samantaray B.B. and Mohanta C.K.. (Dec. 2015). Analysis of industrial flame characteristics and constancy study using image processing technique, *J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 9, pp. 1604–1613.
8. Wójcik W., Kotyra A., Golec T. (2006). Combustion assesment of coal and biomass mixtures using image processing,» в *Symposium on Photonics Technologies for Framework Programme 7 OPERA*, Wrocław,
9. Wójcik W., Kotyra A., Komada P., (2005). Biomass combustion monitoring using fibre-optic probe, *IV International Conference New Electrical and Electronic Technologies and Their Application*, Zakopane,
10. Kotyra A., Wójcik W., Golec T., Komada P. (2007). Assesment of flame stability based on its image features,» *Proceeding of SPIE, Lightguides and Their Applications*, т. 6608, p. 283–287.

Надійшла до редакції 15.07.2024 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 – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», ***e-mail: mtbagan@ukr.netTimur***

TIMUR ARZIKULOV, TARAS BAHAN
**IDENTIFICATION OF A SINGLE TURBULENT GAS FLARE USING COMPUTER VISION TOOLS
AND METHODS IN A BOILER UNIT FIREPLACE SIMULATION INSTALLATION**
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv