

АВТОМАТИЗАЦІЯ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА РОБОТОТЕХНІКА

УДК 621.181.62:004.932.2

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-5-3>

АНАЛІЗ ВІЗУАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОВОГО ФАКЕЛА ТА ПОБУДОВА ЕМПІРИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ЗВОРОТНОГО РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ З МЕТОЮ ІДЕНТИФІКАЦІЇ РЕЖИМІВ ЗГОРАННЯ

Арзікулов Тимур Сейранович,

аспірант

Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,

керівник відділу програмування АСУ

ТОВ «ОКТАВІС Інжиніринг»

ORCID ID: 0000-0002-6774-2477

Баган Тарас Григорович,

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри автоматизації енергетичних процесів

Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID ID: 0000-0002-0146-577X

У статті розроблено та досліджено програмне забезпечення для автоматизованої оцінки якості процесу згорання в газовому факелі на основі методів комп'ютерного зору. Запропонована система призначена для покадрової обробки відео в реальному часі з виділенням ключових візуальних параметрів – площі факела та його середньої яскравості. Програмний комплекс реалізовано на мові Python з використанням бібліотек OpenCV для роботи з відеопотоком та обробки зображень і NumPy для математичних розрахунків.

Основною науковою новизною є використання апроксимованої математичної моделі, отриманої на основі емпіричних даних, яка описує функціональний зв'язок між площею факела та яскравістю для номінального режиму роботи. Ця модель дозволяє здійснювати зворотний розрахунок очікуваної площі факела. Шляхом порівняння цієї розрахункової величини з фактично виміряною площею система виявляє перехід у небажаний режим хімічного недопалу. Для цього введено спеціальний логічний індикатор.

Результати дослідження підтверджують ефективність запропонованого підходу для створення недорогих, швидких та надійних засобів візуального моніторингу горіння в промислових умовах. Головною перевагою методу є його простота та швидкодія. Основним обмеженням є чутливість до змін конфігурації системи (положення камери, оптики), що вимагає переналаштування моделі для кожного нового об'єкта. Розроблене програмне забезпечення може бути інтегроване в контури автоматичного керування котлоагрегатами через OPC UA сервер для оперативного усунення аномалій горіння.

Ключові слова: комп'ютерний зір, обробка зображень, полум'я, горіння, математичне моделювання, Python, автоматичне керування.

Arzikulov Timur, Bahan Taras. Analysis of Visual Characteristics of a Gas Flame and Construction of an Empirical Model for Reverse Calculation of Parameters to Identify Combustion Modes

This paper presents the development and research of software for the automated assessment of combustion quality in a gas flame based on computer vision methods. The proposed system is designed for real-time video processing, extracting key visual parameters – flame area and its average brightness. The software complex is implemented in Python using the OpenCV library for video stream processing and image analysis and the NumPy library for mathematical calculations.

The main scientific novelty lies in the use of an approximated mathematical model, derived from empirical data, which describes the functional relationship between the flame area and its brightness for the nominal operating mode. This model enables the reverse calculation of the expected flame area. By comparing this calculated value with the actual measured area, the system detects a transition to the undesirable mode of chemical underburning (incomplete combustion). A special logical indicator is introduced for this purpose.

The research results confirm the effectiveness of the proposed approach for creating low-cost, fast, and reliable tools for visual combustion monitoring in industrial conditions. The main advantage of the method is its simplicity and high processing speed. The key limitation is its sensitivity to changes in the system configuration (camera position, optics), which requires model recalibration for each new setup. The developed software can be integrated into automatic control loops of boiler units via an OPC UA server for prompt elimination of combustion anomalies.

Key words: computer vision, image processing, flame, combustion, mathematical modeling, Python, automatic control.

Вступ. При дослідженні процесу спалення газів методами комп'ютерного зору, було досліджено значну кількість робіт серед яких роботи китайських [2], румунських [3] та інших іноземних дослідників. Серед яких роботи зі спектроскопії полум'я [4], та роботи з визначення якісного стану горіння на основі зафіксованих хімілюмінісцентних провів, що фіксуються звичайними відеокамерами [2].

Існує багато методів побудови моделі взаємозв'язку між фіксованим зображенням та станом горіння. Однією з головних складових кожного методу є програмно-математичний апарат обробки зображення. Оскільки об'єм інформації, яку передає кожне зображення (кадр), є значним і надходить із високою частотою, необхідно забезпечити швидке та ресурсоефективне програмне забезпечення (далі – ПЗ). Саме інформація, отримана після обробки зображень, надходить на вхід математичних

моделей або нейронних мереж для подальшого аналізу.

Методи дослідження. У статті розглядається ПЗ, створене для експериментальної установки з ідентифікації одиночного турбулентного газового факела, а також його структура. Крім того, описується математична модель об'єкта, отримана на основі даних попередніх досліджень та реалізована в межах самого ПЗ. Схема установки наведена на зображенні нижче (Рисунок 1) та детально описана в статті [1], яка є третьою в циклі вивчення цього питання, за винятком того, що між ПК і вимірювальними приладами було додано додатковий контролер на базі Raspberry Pi.

При розробці першої версії ПЗ використовувалась мова програмування Python v3.10. Незважаючи на невисоку швидкодію, завдяки використанню бібліотек із прекомпільованим кодом, цей недолік було значною мірою компенсовано.

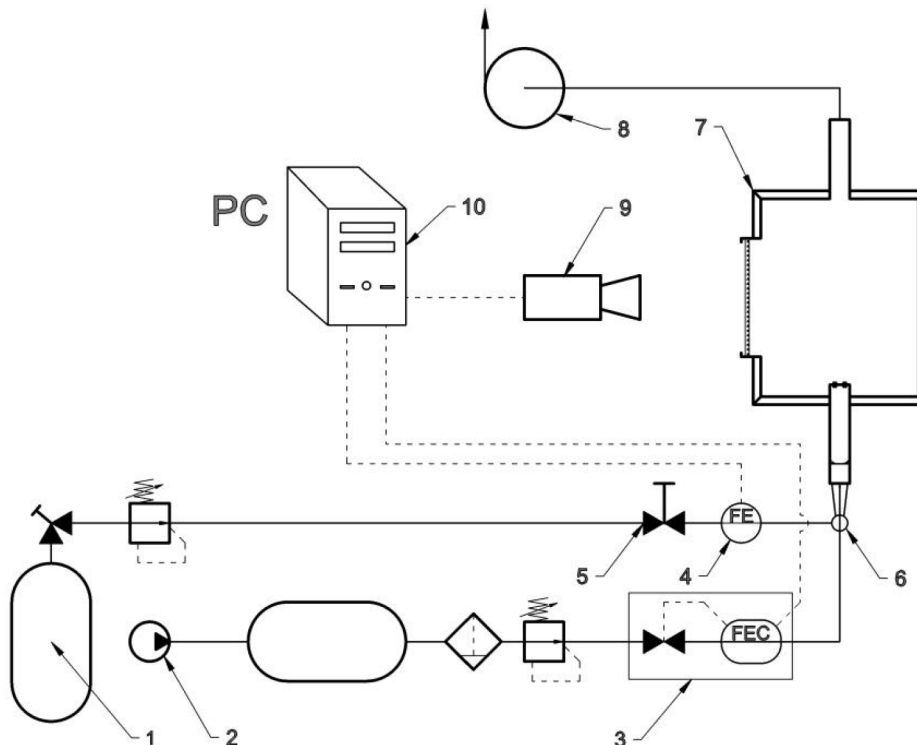


Рис. 1. Структура випробувального стенду: 1 – метановий балон; 2 – компресор з ресивером; 3 – витратомір-регулятор SFC5500-200slm; 4 – витратомір SFM550-10slm; 5 – регулюючий вентиль подачі газу; 6 – ежектор з камерою змішування; 7 – камера спалення із оглядовим вікном; 8 – димосмок; 9 – камера; 10 – станція обробки даних

Доступність інструментів Python у поєднанні з великою кількістю спеціалізованих модулів робить його привабливим для швидкої розробки.

Модуль OpenCV обрано для роботи з камерами та обробки зображень. Його вбудовані функції дозволяють виконувати згладжування шумів, обрізку зображення до області інтересу, а також маскуванню фону. Модуль NumPy використано для визначення якісних показників на основі математичної обробки масиву даних зображення.

Відкрита ліцензія обох модулів дозволяє їх вільне використання в особистих і комерційних проєктах, що значно спрощує перехід від прототипу до повноцінного комерційного рішення.

Створена математична модель використовується як найменш ресурсозатратний метод оцінки якісних показників, що передаються до контуру регулювання через OPC UA сервер.

Структура ПЗ. Система приймає два основні типи вхідних даних: відеозображення полум'я (з відеокамери) та дані витрат газу й повітря (через OPC UA від сенсорів). Вони надходять у реальному часі та використовуються для подальшої обробки й аналізу.

Програмне забезпечення реалізовано у вигляді додатку, написаного мовою Python. Блок-схема його роботи наведена на Рисунку 2.

Програма виконується у циклі без чітко визначеного завершення. Умовно можна виділити три основні модулі:

- **pyOPCUA** – забезпечує комунікацію між пристроями мережі.

- **OpenCV (cv2)** – відповідає за роботу з відеокамерами та зображеннями.

- **NumPy** – використовується для обчислення якісних показників зображення та вхідних параметрів для оцінки процесу горіння.

Алгоритм роботи ПЗ можна умовно поділити на п'ять етапів: підготовка, отримання даних, попередня обробка, аналіз і виведення результатів.

Підготовка. Після запуску, ініціалізується локальний OPC UA сервер, який забезпечує можливість вводу та виводу інформації з локальних і віддалених клієнтів мережі. Далі встановлюється з'єднання з відеокамерою. Залежно від типу підключення, налаштування можуть варіюватися. При прямому підключенні через USB процес ініціалізації спрощується.

Отримання даних. Дані надходять двома каналами: показники витрат повітря та газу передаються через OPC UA на сервер, тоді як відеодані надходять напямую через з'єднання, встановлене за допомогою модуля cv2. Відео дані сприймаються покадрово, у вигляді тривимірної матриці, що містить дані по трьох каналах (кольорах).

Попередня обробка. Дані з витратомірів не потребують обробки – вона здійснюється на

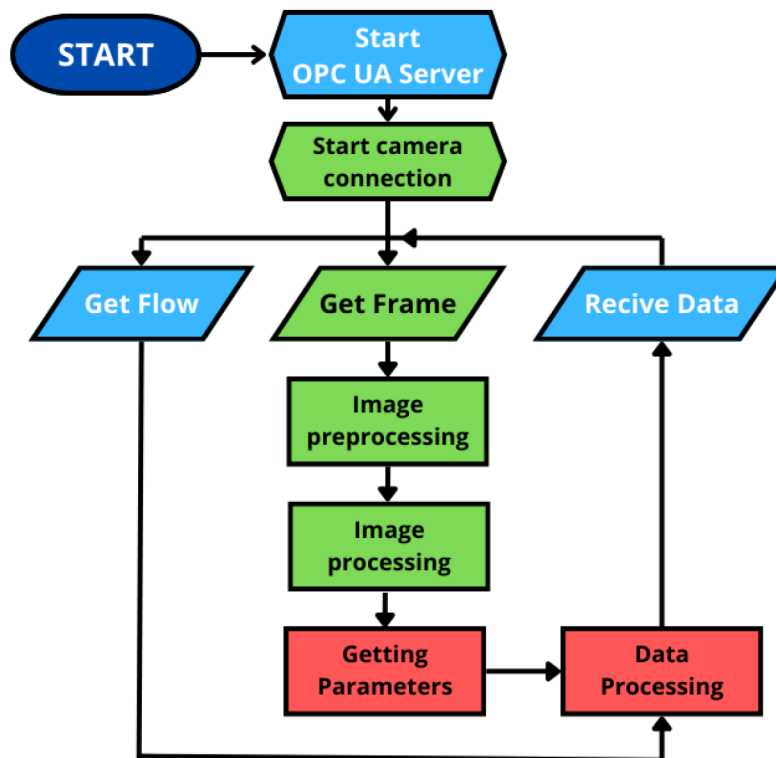


Рис. 2. Блок-схема ПЗ

стороні клієнта, що записує значення на сервер. Зображення ж обробляється у два етапи:

- Згладжування шумів та переведення в чорно-білий формат.
- Маскування фону на основі яскравості, щоб залишити лише найбільш яскраві об'єкти. Для однофакельних сцен на однорідному фоні цього достатньо. У разі присутності кількох факелів або інших об'єктів необхідне додаткове сегментування.

Маскування можна виконати двома способами:

- 1) за допомогою функції `cv2.threshold()`;
- 2) або шляхом перевірки кожного елементу матриці на відповідність умові (наприклад, `value >= threshold`).

У цьому випадку створюється матриця логічних значень (маска), яку можна накладати як на чорно-біле, так і на кольорове зображення, отримуючи результат із видаленим фоном (пікселі якого мають значення яскравості, рівне нулю).

Аналіз. Аналіз отриманих даних відбувається так само в два етапи:

1. Визначення параметрів зображення.
2. Визначення якісного стану горіння на основі отриманих параметрів.

Визначення параметрів зображення. Після маскування фону на чорно-білому та кольоровому зображенні ми отримуємо дві матриці (двовимірні для чорно-білого зображення та тривимірні для кольорового), у яких значення пікселів фонового зображення прирівняні до 0. Оцінювання таких параметрів як площа факелу та яскравість відбувається по матриці значень чорно-білого зображення. Площа визначається як кількість ненульових значень, середня яскравість факела визначається як середній показник яскравості ненульових елементів.

Математичний апарат. Оброблене чорно-біле зображення полум'я, зі згладженими шумами та видаленим фоном, подається у вигляді двовимірної матриці яскравості:

$$B = B(i, j), \quad i = 1 \dots H, \quad j = 1 \dots W \quad (1)$$

де: $B(i, j) \in [0, 255]$ – значення яскравості в пікселі з координатами (i, j) ,

$H \times W$ – розмірність зображення.

Для подальшої обробки, необхідно визначити підмножину ненульових елементів, яка буде містити лише дані тих пікселів, що мають безпосереднє відношення до зображення факелу. Визначимо підмножину пікселів $A \subseteq B$, для яких $B(i, j) > 0$.

Тоді:

$$A = (b_{ij} | b_{ij} \in B, \quad b_{ij} \neq 0). \quad (2)$$

Площа факелу представляється як площа проекції тіла факелу на зображенні і визначається як кількість пікселів, що мають ненульове значення.

Звідси представимо площу факела ($|A|$) як:

$$|A| = \sum_{i,j} [b_{ij} \neq 0]. \quad (3)$$

Середня світимість факела другий необхідний для оцінки якості показник, визначається як середнє значення всіх елементів, що відносяться до підмножини A .

Представимо середню світимість факела (L_{avg}) як:

$$L_{avg} = \frac{1}{|A|} \sum_{b_{ij} \in A} b_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{i,j} b_{ij} | b_{ij} \neq 0. \quad (4)$$

Для отримання показників інтенсивності випромінювання по окремим каналам кольорового зображення, використаємо форму 4, замінивши матрицю B на матриці $C1, C2, C3$, які є проєкціями матриці $C(i, j, 3)$ по окремим каналам зображення.

Створення моделі на основі емпіричних даних. Після визначення параметрів зображення факелу відбувається аналіз якісного стану процесу спалення газу. Аналіз відбувається на основі відповідності параметрів апроксимованій математичній моделі, отриманої в ході обробки експериментальних даних отриманих при написанні роботи [1].

Розглянемо вихідні дані експерименту:

На рисунку 3(а) ми бачимо графік залежності площі факелу та світимості при усталених витратах газу та різних значеннях ϕ (коефіцієнт відповідності стехіометричного співвідношення газу й повітря). на рисунку 3(б) бачимо графік із відфільтрованих даних, де коефіцієнт $\phi \geq 1$, що, відповідно до роботи [1] здійснюється відсіканням тих точок, де рівень випромінювання за червоним каналом зображення більший, або дорівнює рівню випромінювання за іншими каналами.

Апроксимували функціональну залежність між площею факела та його яскравістю (F), вдалося отримати аналітичні вирази для зворотнього розрахунку площі факела при заданому рівні світимості та фіксованій витраті газу.

На основі цих даних було складено порівняльну таблицю, що відображала зміни площі факела за різних витрат газу при однакових рівнях світимості. На її основі було обчислено відношення площ факелів до номінальної площі при витраті 6,8 slm.

$$\bar{\epsilon} = F_n(L_{avg}) / F_{nom}(L_{avg}), \quad (5)$$

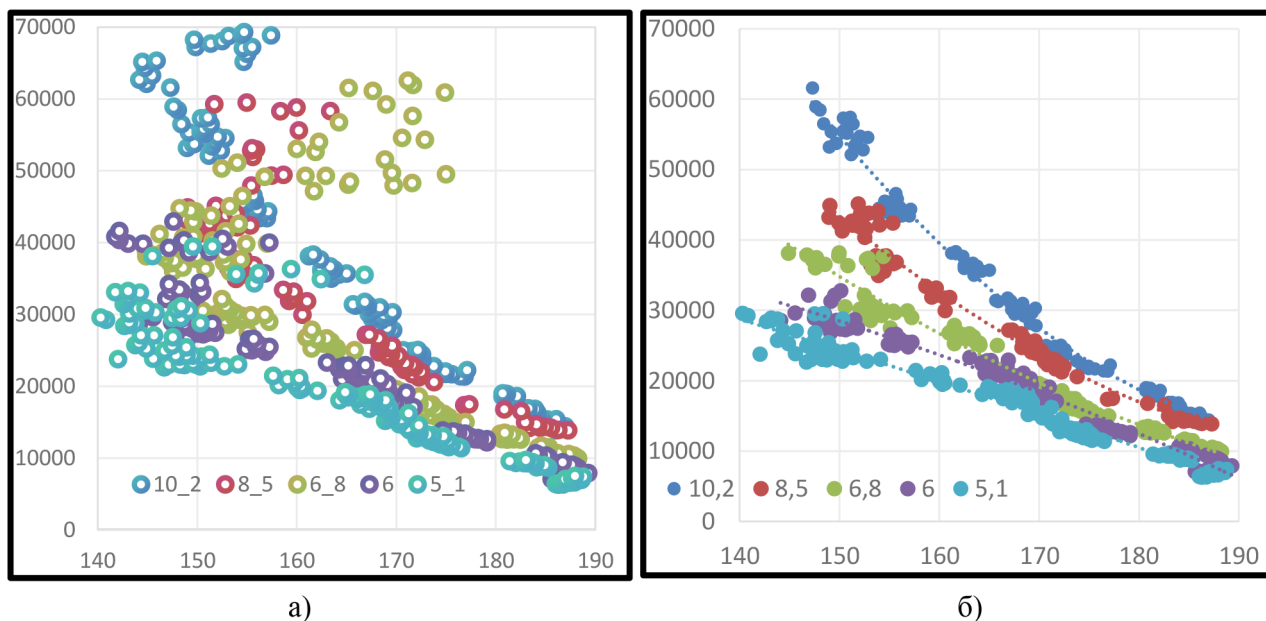


Рис. 3. Залежність площі факелу від світимості. Експериментальні дані: а) вхідні дані; б) відфільтровані

Де $\vec{\epsilon}$ – це вектор коефіцієнтів співвідношення площі факела при різних світимостях та витратах

Для наочності, побудовано графіки коефіцієнтів пропорційності площі факела для різних витрат газу відносно номінальної витрати, в залежності від рівня світимості (Рисунок 4).

На рисунку 5 подано узагальнені функціональні залежності, побудовані за результатами серії випробувань з використанням різних оптичних систем. Вони демонструють взаємозв'язки: (1) яскравості від якісного стану горіння, (2) площі факела від яскравості, (3) площі факела від якісного стану горіння.

Виявлені емпіричні залежності на рисунках 5.1 та 5.2 демонструють наявність нелінійних залежностей між параметрами, що робить неможливим визначення якісного стану горіння спираючись лише на один з них. Виникає необхідність визначення якісного переходу режиму горіння.

Враховуючи наведені емпіричні залежності, стає можливим зворотній розрахунок площі факела на основі апроксимованої функції залежності, що зображена на рисунку 3(б), для нормальної витрати газу (6,8 slm) із врахуванням коефіцієнту співвідношення площ факелів для поточної витрати та світимості ($\hat{a} \ni \vec{\epsilon}$).

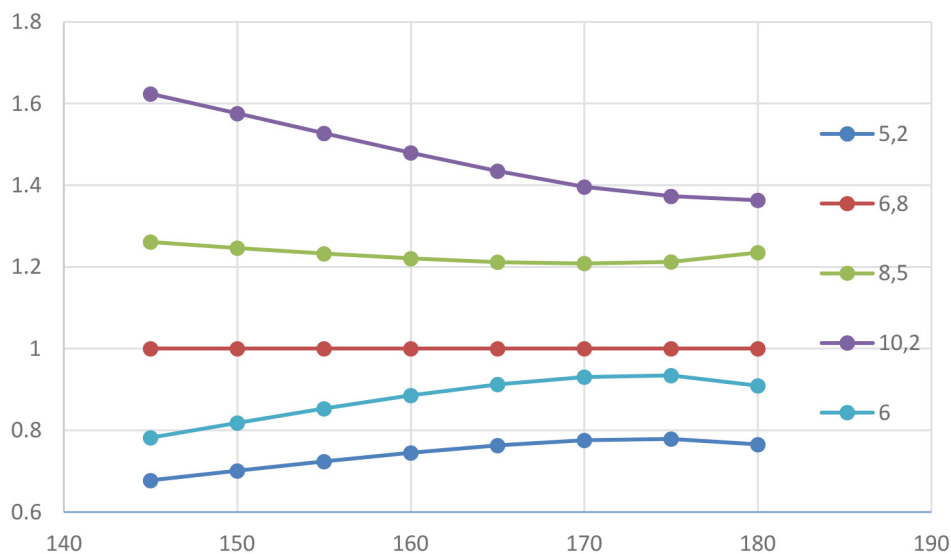


Рис. 4. Графік відношення площі факелу від витрати при різних рівнях світимості

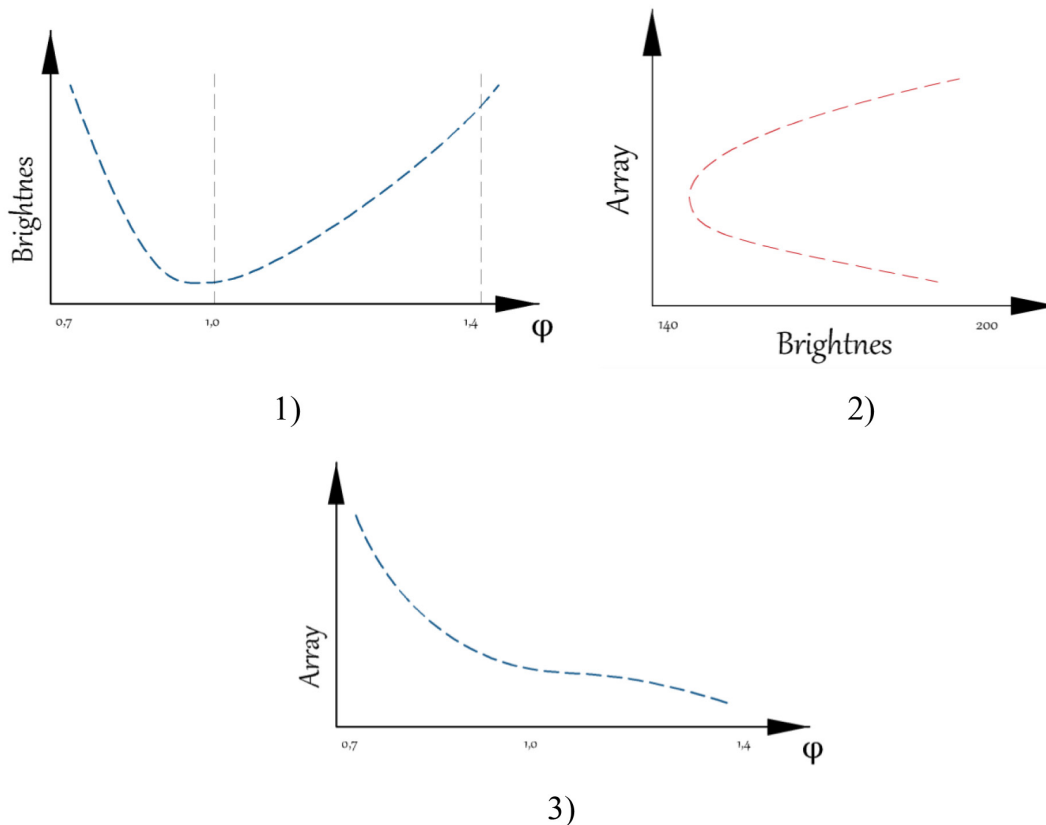


Рис. 5. Загальний вигляд залежностей: 1 – яскравості від якісного режиму згорання палива; 2 – площі факелу від яскравості; 3 – площі факелу від якісного стану горіння

$$A_{calc} = F_{nom}(L_{avrg_curr}) * \varepsilon, \quad (6)$$

Проведення зворотної калькуляції на основі математичної моделі є необхідним задля коректної оцінки поточного стану факелу на основі його візуальних характеристик, адже, як ми бачимо з рисунку 3(а), а також рисунку 4(2), при переході через межу хімічного недопалу, спостерігається очевидна нелінійність функції у вигляді нахиленої параболи.

Таким чином, порівнявши розраховане значення площі факела із фактичним, ми можемо виявити перехід графіку від кривої горіння з надлишком повітря, до кривої горіння у режимі хімічного недопалу. Для цього введемо в систему індикатор β.

$$\beta = (A_{calc} * \alpha) < A_{fact}, \quad (7)$$

де: β – логічний індикатор переходу до хімічного недопалу;

α – коефіцієнт допуску, що більший 1.0.

При виявленні хімічного недопалу, система керування має змінити свою поведінку та ігнорувати збільшення яскравості як сигнал збільшення надлишку повітря (згідно рисунку 5.1) та виконати дії для усунення хімічного недопалу.

Результати дослідження. Вхід дослідження було розроблено та реалізовано програмне забезпечення (ПЗ) на Python з використанням

бібліотек OpenCV та NumPy для аналізу якості горіння газового факелу в реальному часі. Ключовими результатами є успішне виділення двох основних параметрів із відеопотоку: площі факела та його середньої яскравості.

Емпіричним шляхом, на основі обробки експериментальних даних, було встановлено функціональні залежності між цими параметрами та якісним станом горіння (коефіцієнтом φ). Зокрема, була апроксимована математична модель, яка описує зв'язок між площею факела та його яскравістю для номінальної витрати газу (6,8 slm). Ця модель дозволяє здійснювати зворотний розрахунок очікуваної площі факела (A_{calc}) за поточно виміряною яскравістю (L_{avrg_curr}) та відхиленням витрати газу від номінального значення (через коефіцієнт ε).

Найважливішим практичним результатом є розробка критерію для виявлення режиму хімічного недопалу. Індикатор β, розрахований як порівняння розрахункової площі (з урахуванням коефіцієнта допуску α) з фактично виміряною площею (A_{fact}), надійно ідентифікує перехід у небажаний режим горіння.

Дискусія. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованого підходу на основі комп'ютерного зору для створення недорогих систем моніторингу. Головною перевагою

методу є його швидкодія та простота реалізації порівняно зі складними спектроскопічними методами або нейромережевими моделями, що потребують великих обчислювальних потужностей та наборів даних для навчання.

Однак, обговорюючи результати, важливо відзначити істотні обмеження запропонованого рішення. Система демонструє високу чутливість до змін конфігурації експериментального стенду (положення камери, оптичні властивості, конструкція пальника). Це означає, що для кожної нової установки необхідно збирати новий набір емпіричних даних та переналаштовувати модель, оскільки вона не має властивостей адаптації та узагальнення.

Дискусійним також є вибір порогових значень, зокрема коефіцієнта допуску α , який вносить суб'єктивізм і потребує додаткового експериментального підбору для кожної конкретної системи.

У порівнянні з іншими дослідженнями (наприклад, [2], [5]), де використовуються хемілюмінесценція та кольорові характеристики полум'я, запропонований метод є менш інформативним, але значно більш практичним і економічно доцільним для промислового застосування, де головним завданням є оперативне виявлення аномалій (недопалу), а не точне визначення всіх параметрів полум'я.

Таким чином, хоча метод і не є універсальним, він пропонує ефективне рішення для конкретного класу задач – швидкого та дешевого моніторингу якості горіння в стабільних, добре налаштованих системах з відомими початковими параметрами.

Висновки. Проведене дослідження довело ефективність застосування методів комп'ютерного зору для розробки недорогої системи моніторингу якості процесу горіння газу в реальному часі. Ось основні підсумки:

Розроблено працездатне програмне рішення: Створено програмне забезпечення на основі Python, OpenCV та NumPy, здатне швидко обробляти відеопотік, виділяти та аналізувати ключові візуальні параметри факела – площу та середню яскравість.

Встановлено та використано емпіричні залежності: На основі експериментальних даних апроксимовано математичну модель, що описує зв'язок між площею факела та його яскравістю для номінального режиму роботи. Ця модель стала основою для зворотного розрахунку очікуваної площі.

Запропоновано критерій для ідентифікації недопалу: Головним науково-практичним результатом є розробка логічного індикатора (β), який шляхом порівняння розрахункової та фактичної площі факела дозволяє надійно виявляти перехід процесу горіння в режим хімічного недопалу. Це дає змогу системі автоматичного керування вчасно реагувати та усувати аномалію.

Визначено переваги та обмеження:

Перевагою методу є його висока швидкодія, низька вартість реалізації та простота в порівнянні зі складними спектроскопічними методами.

Головним недоліком є чутливість до змін конфігурації системи (положення камери, оптики, конструкції пальника). Це робить модель неадаптивною та вимагає її переналаштування для кожної нової установки шляхом збору нових емпіричних даних.

Перспективи подальших досліджень полягають у вдосконаленні методу для підвищення його універсальності, зокрема, шляхом інтеграції нейромережових алгоритмів, здатних до самонавчання та адаптації до різних конфігурацій, а також у пошуку більш інваріантних до умов зйомки візуальних ознак.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Арзікулов Т. С., Баган Т. Г. Ідентифікація одиночного турбулентного газового факела засобами й методами комп'ютерного зору в імітаційній установці топки котлоагрегата. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. 2024, 48(2), с. 249–260. <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2024-48-2-249-260>
2. Yang H., Lai Y., Liu X., others. Equivalence ratio modelling of premixed propane flame by multiple linear regression using flame color and spatial characteristics. *Measurement Science Review*. 2023, 23(1), p. 40–46. <http://dx.doi.org/10.2478/msr-2023-0005>
3. Józsa V., Sztankó K. Flame emission spectroscopy measurement of a steam blast and air blast burner. *Thermal Science*. 2017, 21(2), p. 1021–1030. <http://dx.doi.org/10.2298/TSC1150616062J>
4. Merotto L., Sirignano M., Commodo M., D'Anna, A., Dondè, R., & De Iuliis, S. Experimental characterization and modeling for equivalence ratio sensing in non-premixed flames using chemiluminescence and laser-induced breakdown spectroscopy techniques. *Energy & Fuels*. 2017, 31(3), p. 3227–3233. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b03094>

REFERENCES:

1. Arzikulov, T.S., & Bahan, T.H. (2024). Identyfikatsiia odynochnoho turbulentnoho hazovoho fakelu zasobamy y metodamy kompiuternoho zoru v imitatsiinii ustanovtsi topky kotloahrehata [Identification of a single turbulent gas flare using computer vision tools and methods in a boiler unit furnace simulation setup]. *Optyko-elektronni informatsiino-enerhetychni tekhnolohii*, 48(2), 249–260. <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2024-48-2-249-260> [in Ukrainian].
2. Yang, H., Lai, Y., Liu, X., & others. (2023). Equivalence ratio modelling of premixed propane flame by multiple linear regression using flame color and spatial characteristics. *Measurement Science Review*, 23(1), 40–46. <http://dx.doi.org/10.2478/msr-2023-0005>
3. Józsa, V., & Sztankó, K. (2017). Flame emission spectroscopy measurement of a steam blast and air blast burner. *Thermal Science*, 21(2), 1021–1030. <http://dx.doi.org/10.2298/TSC150616062J>
4. Merotto, L., Sirignano, M., Commodo, M., D'Anna, A., Dondè, R., & De Iuliis, S. (2017). Experimental characterization and modeling for equivalence ratio sensing in non-premixed flames using chemiluminescence and laser-induced breakdown spectroscopy techniques. *Energy & Fuels*, 31(3), 3227–3233. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b03094>

Стаття надійшла: 22.08.2025

Стаття прийнята: 15.09.2025

Опублікована: 10.11.2025

