

УДК 696.2:504.1

аспірант **Ярослав Швець**
shvets198507@gmail.com, ORCID: 0009-0008-0997-6989
Київський національний університет
будівництва і архітектури

СУЧАСНІ ТА ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ АКТИВІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ГОРІННЯ В КОМУНАЛЬНІЙ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЦІ

Анотація. У статті досліджено теоретичні засади та прикладні аспекти процесу горіння газового палива в обладнанні комунальної теплоенергетики. Особливу увагу приділено вивченню чинників, що визначають повноту згоряння, як-от температурний режим, ступінь турбулізації потоку, рівномірність змішування палива з повітрям, склад паливоповітряної суміші, а також аеродинамічні характеристики факела. У контексті підвищення ефективності та екологічної безпеки систем теплопостачання проаналізовано сучасні методи активізації процесу горіння. Серед них розглянуто використання лазерного запалювання як способу забезпечення стабільного й контрольованого запуску процесу, застосування електричних та магнітних полів для впливу на іонізовані продукти горіння та прискорення реакцій окиснення, а також попереднє озонування паливоповітряної суміші з метою збагачення її сильним окисником. Наведено результати техніко-економічного аналізу доцільності впровадження зазначених технологій у практику експлуатації комунальних теплогенерувальних систем. Обґрунтовано, що застосування інноваційних підходів до керування процесом горіння дає змогу не лише підвищити енергоефективність, а й суттєво знизити рівень шкідливих викидів, зокрема оксидів азоту (NO_x), що є одним із ключових забруднювачів атмосферного повітря. Також акцентовано увагу на перспективах подальших досліджень, спрямованих на вдосконалення технологій згоряння газоподібного палива в контексті сучасних вимог до екологічної безпеки, ресурсозбереження та надійності функціонування теплопостачальних систем у містах.

Ключові слова: горіння, газове паливо, теплоенергетика, активізація горіння, озон, лазерне запалювання, NO_x , електричне поле.

Постановка проблеми. Комунальна теплоенергетика є ключовим компонентом енергетичної інфраструктури України. За даними Держенергоефективності, понад 80% котелень у комунальному секторі використовують обладнання, яке експлуатується понад 20 років, що призводить до низької ефективності та значних втрат енергії [1]. У середньому, питомі витрати природного газу в таких установках перевищують нормативні на 12–

18 % [2]. Застарілі пальникові пристрої, відсутність точного регулювання подавання повітря та недосконала система автоматизації призводять до неповного згоряння газу, утворення оксидів азоту (NO_x), чадного газу (CO) і надлишкового CO_2 [3]. Проблема має не лише екологічний, а й економічний характер. Наприклад, при добовому споживанні 1000 м^3 природного газу, втрати теплоти через неповне згоряння можуть перевищувати $150\text{--}200 \text{ м}^3$ на місяць. Такі втрати в масштабах країни становлять мільярди гривень щорічно. Крім того, викиди NO_x сприяють утворенню фотохімічного смогу, кислотних дощів і забрудненню повітря [4]. У зв'язку з цим актуальним є впровадження новітніх технологій активізації горіння, які дозволяють не лише знизити екологічне навантаження, а й підвищити паливну ефективність систем теплопостачання. Серед них особливу увагу приділяють методам озонування, лазерного запалювання та електромагнітної активації, які довели свою ефективність у міжнародній практиці [5-7].

Актуальність дослідження фізико-хімічних основ горіння. Горіння природного газу, зокрема метану, є результатом ряду радикальних реакцій, що відбуваються в умовах високої температури. Цей процес передбачає послідовне утворення і зникнення активних проміжних продуктів, таких як H , O , OH , CH_3 , які є ключовими у механізмі реакцій [1,3,8].

Математичне моделювання процесу горіння базується на рівняннях Нав'є-Стокса з долученням рівнянь масообміну, теплопровідності та хімічної кінетики.

У практиці інженерного аналізу використовують спрощені кінетичні моделі, наприклад модель однієї глобальної реакції або механізми GRI-Mech для метану [4]. Температура полум'я для стехіометричного складу газоповітряної суміші метану сягає $1950\text{--}2050 \text{ }^\circ\text{C}$. При надлишковому повітрі температура знижується, що призводить до зниження ефективності, але й до менших викидів NO_x [2].

Швидкість хімічної реакції, зокрема реакції горіння метану, тісно пов'язана з температурою, що відображається рівнянням Арреніуса [3]:

$$k(T) = A \cdot e^{-E_a/(Rt)},$$

де $k(T)$ — константа швидкості реакції, с^{-1} ; A — частотний множник або передекспоненційний фактор с^{-1} , E_a — енергія активації (Дж/моль), R — універсальна газова стала, що становить $8,314 \text{ Дж/моль}\cdot\text{К}$, T — температура, К .

Для метану типовими є значення $A = 1.3 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$, $E_a = 1.1 \cdot 10^5 \text{ Дж/моль}$. Нижче наведено графік залежності швидкості реакції горіння метану від температури за рівнянням Арреніуса:



На графіку видно, що зі зростанням температури експоненціально зростає константа швидкості реакції. Це характерно для реакцій, описуваних рівнянням Арреніуса, де при підвищенні температури зменшується вплив енергетичного бар'єра активації. Такий аналіз дозволяє краще зрозуміти, чому в практиці горіння метану важливо підтримувати високу температуру – для забезпечення швидкого і повного згоряння палива.

Зростання температури обмежене через термостійкість обладнання та побічні реакції з виділенням, зокрема, токсичних оксидів азоту. Тому для інтенсифікації горіння у теплотехніці дедалі більше застосовуються методи фізико-хімічної активації горіння. Один із найперспективніших – використання озону як сильного окиснювача [6, 7]. Завдяки високій реакційній здатності озон дозволяє ініціювати реакції окиснення при нижчих температурах, ніж кисень. Експерименти показали, що введення озону у паливоповітряну суміш зменшує час займання у 2–3 рази та підвищує температуру полум'я на 80–150 K [9]. Інший напрям – лазерне запалювання, яке забезпечує точкове ініціювання полум'я в найбільш сприятливих умовах [5]. Електричні та магнітні поля впливають на електронну структуру молекул, прискорюючи утворення активних радикалів, зокрема O, OH, H, CH₃, що значно прискорює хімічну реакцію окиснення [10].

Дослідження сучасних методів активізації процесу горіння газового палива демонструють зростаючий інтерес до впливу фізичних полів та модифікаторів складу реагентів. Крім озонування, лазерного запалювання та

електромагнітного впливу, перспективними є методи ультразвукової активація, використання аерозольних добавок та нанокаталізаторів.

Ультразвукова активація передбачає введення у газоповітряну суміш механічних коливань частотою понад 20 кГц, які інтенсифікують змішування, а також локально підвищують температуру, що активує радикальні реакції. За даними досліджень Університету Торонто, такий підхід дозволив знизити викиди СО до 35% при стабільному ККД [11].

Аерозольні добавки (наприклад, гетероатомні сполуки на основі Fe, Se, Mn) можуть виступати каталізаторами окиснення, ініціюючи реакції навіть у зонах недостатнього окиснювача. Це дозволяє «допалювати» продукти неповного горіння, а також стабілізувати полум'я в режимах часткового навантаження. У Китаї подібні технології використовуються у системах централізованого теплопостачання, де ефективність згоряння зростає на 6–8% при зменшенні викидів NOx [12].

Ще одним новим напрямком є нанокаталіз. Застосування наночастинок платини, паладію або оксидів перехідних металів дозволяє прискорити поверхневі реакції на стінках пальникового пристрою. Наприклад, в Угорщині розроблено пальник з покриттям з наноструктурованого оксиду церію, який зменшує час займання на 40% і забезпечує повне згоряння навіть за низьких температур [13].

Також перспективною є технологія плазмохімічної активації – створення коронного або бар'єрного розряду в зоні горіння. Вона дозволяє збільшити кількість активних іонів і радикалів, що пришвидшує реакції згоряння. Згідно з дослідженнями Сеульського університету, плазмова активація забезпечує економію палива на 4–6% при зменшенні викидів СО на 20% [14].

Таким чином, сучасна наука пропонує широкий спектр фізико-хімічних засобів керування процесом горіння, що відкриває нові можливості для модернізації комунальних систем теплопостачання в Україні.

Міжнародний досвід свідчить про активне використання знань фізико-хімічної природи процесів горіння для оптимізації роботи теплотехнічного обладнання. У Німеччині та Швейцарії активно застосовуються низькотемпературні пальникові пристрої з попереднім змішуванням, які працюють у режимі ламінарного горіння з метою мінімізації утворення NOx. Такі пристрої розроблені на основі CFD-моделювання хімічної кінетики та тепломасообміну в полум'ї [1].

У Японії в міських когенераційних установках впроваджені технології горіння із застосуванням пароводяного емульгування газоповітряної суміші. Це дозволяє змінювати фізичні властивості середовища згорання, знизити температуру горіння на 100–150 К і зменшити NOx на 30–40%. Фізико-хімічне

обґрунтування таких систем базується на зниженні пікової температури полум'я та гальмуванні радикальних реакцій [2].

У Данії в рамках програм енергоощадності у муніципальних котельнях використовуються модифіковані пальники з багатоетапним подаванням повітря. Дослідження показують, що при роздільній подачі повітря по зонах пальника змінюється локальна стехіометрія, а отже і характер хімічних реакцій у полум'ї. Це дозволяє знизити утворення СО в 3 рази без зменшення температури на виході [8, 9].

В Ізраїлі застосовується метод ультразвукової модуляції полум'я, що полягає у зміні щільності теплового потоку шляхом створення високочастотних коливань. Ці коливання активізують мікроскопічне перемішування у зоні горіння, що позитивно впливає на зменшення утворення сажі та незгорілих залишків [4].

Завдяки широкому використанню методів чисельного моделювання (ANSYS Fluent, CHEMKIN, OpenFOAM) вказані країни змогли значно підвищити точність проєктування пальників та топкових камер, що підтверджено зменшенням питомої витрати газу на 6–12% у порівнянні з традиційними установками [3, 15].

Значущу роль у формуванні ефективного горіння відіграє також структура полум'я та механізми тепломасообміну. Розрізняють ламінарне, турбулентне та перехідне горіння, кожне з яких має свій вплив на інтенсивність реакцій і утворення шкідливих домішок. Турбулентне горіння, що характерне для більшості промислових пальників, забезпечує краще перемішування та швидкість реакцій, однак також сприяє локальним перегрівам, які активізують термічне утворення NO_x [1].

Сучасні методи діагностики — спектроскопія, лазерна доплерівська анемометрія та хімічна томографія — дозволяють простежити динаміку концентрацій активних частинок у полум'ї, визначити градієнти температури та густини, а також верифікувати математичні моделі [4]. Це дає змогу оптимізувати параметри подачі палива та окислювача в режимі реального часу, забезпечуючи максимально повне згоряння з мінімальними викидами.

Загалом, фізико-хімічні основи горіння є міждисциплінарною проблематикою, що охоплює термодинаміку, молекулярну хімію, турбулентність, теплообмін і масообмін. Розуміння цих процесів є критично важливим для ефективного проєктування та модернізації систем теплогенерації в комунальній сфері України.

Отже, у Німеччині з 2018 року впроваджуються установки озонного збагачення повітря для котелень потужністю до 1 МВт. Економія газу досягає 8%, а викиди NO_x зменшуються на 25% [7]. У США компанії, що виробляють

когенераційні установки, застосовують лазерне займання для стабілізації полум'я [5]. У Японії дослідницькі лабораторії продемонстрували ефективність магнітного поля, яке підвищує ступінь повноти згоряння до 98% [10]. В Україні перспективним є пілотний проєкт у Києві на базі модернізованої котельні з використанням генератора озону, що демонструє скорочення витрат палива на 6%.

Розрахунок техніко-економічної ефективності методів активізації горіння базується на оцінці зменшення витрати газу, вартості обладнання та терміну його окупності. Згідно з результатами досліджень, зменшення споживання природного газу на 5–8% при впровадженні озонного методу є типовим для котелень потужністю 1–5 МВт [7, 12]. Витрати на генератор озону продуктивністю 250 мг/м³ становлять орієнтовно 50–70 тис. грн, а щорічна економія при добовій економії 80 м³ газу сягає 300–350 тис. грн [6]. Таким чином, термін окупності становить 2–3 місяці, що свідчить про високу ефективність інвестицій.

Щодо лазерного запалювання, то ефект економії газу становить 2–3%, однак технологія забезпечує стабільність запуску систем навіть при температурах нижче -20 °С, що особливо важливо для північних регіонів [5]. Вартість імпульсного лазерного запалювача становить 25–35 тис. грн при ресурсі роботи понад 5 років. Окупність такого рішення – близько 1 року для котельні потужністю до 0,5 МВт.

Досвід застосування магнітного впливу демонструє економію до 4% палива, але ефект залежить від конфігурації обладнання та стабільності параметрів роботи. Встановлення магнітного активатора (індукційне кільце або феромагнітна сітка) коштує 10–12 тис. грн, а річна економія для споживання 100 тис. м³ газу – близько 40 тис. грн [10].

Таким чином, усі розглянуті методи мають позитивний економічний ефект, проте озонування залишається найефективнішим з точки зору швидкості окупності та впливу на екологічні показники [7, 13, 14].

Додаткову увагу слід приділити оцінці економічної доцільності впровадження комбінованих систем активізації, де одночасно застосовуються декілька технологій: наприклад, озонування в поєднанні з автоматизованим регулюванням коефіцієнта надлишку повітря або лазерне запалювання в тандемі з плазмохімічною активацією.

За результатами пілотного дослідження в умовах модельної котельні (2 МВт) така комбінація дозволила досягти економії палива на рівні 9,6% при скороченні загального часу пуску обладнання на 42% та зменшенні викидів NO_x на 28%.

Окрім безпосередніх фінансових вигід, важливо враховувати економічний

ефект від зменшення часу простою обладнання, особливо у випадках аварійного запуску під час опалювального періоду. Згідно з оцінками Асоціації енергоаудиторів України, щогодинна зупинка котельні середньої потужності в опалювальний період коштує підприємству від 300 до 800 грн у вигляді штрафів, втрат тепла, компенсацій тощо. Застосування більш надійних методів запалювання (наприклад, лазерного) дозволяє знизити кількість таких зупинок на 60–70%.

Також варто враховувати потенційну економію при переведенні котелень на часткову автономію, де зменшення обсягів постачання тепла із зовнішніх джерел компенсується локальною генерацією з високим ККД. В умовах високих тарифів це дає відчутний бюджетний ефект для місцевих громад.

Загалом, розширений розрахунок економічної ефективності впровадження фізико-хімічних методів активізації горіння має включати повний життєвий цикл обладнання, витрати на технічне обслуговування, екологічні платежі та можливі компенсації за скорочення викидів парникових газів у рамках міжнародних кліматичних механізмів відображений в таблиці 1.

Таблиця 1. Порівняння ефективності різних методів активізації горіння природного газу

Метод	Заоща- дження палива, %	Знижен- ня вики- ду NO _x , %	Вартість облад- нання, грн/МВт	Окуп- ність, міс.	Додаткові переваги
Озону- вання	5–8	25–30	25 000 – 35 000	2–3	Підвищення повноти згоряння, екологічний ефект
Лазерне запалю- вання	2–3	5–10	12 500 – 17 500	10–12	Надійний запуск при низьких температурах
Магнітна активація	3–4	10–15	5 000 – 7 500	10–14	Просте встановлення, низька вартість
Плазмо- хімічна активація	4–6	15–20	20 000 – 30 000	8–10	Активація навіть при низькому тиску
Ультра- звукова активація	4–5	20–30	15 000 – 22 500	6–9	Покращення змішування, зменшення сажі
Нано- каталіз	5–7	20–25	30 000 – 40 000	10–13	Повне згоряння при низьких температурах

Ураховуючи отримані результати та міжнародний досвід, стає очевидним, що активізація процесів горіння є не лише науково обґрунтованою, а й економічно доцільною для комунального сектору України. Впровадження інноваційних методів – таких як озонування, лазерне запалювання, плазмохімічна активація та нанокаталіз – відповідає викликам часу, пов'язаним з енергетичною незалежністю та екологічною безпекою.

На сьогодні більшість теплогенераційних об'єктів у комунальній сфері працюють за застарілими технологіями 80–90-х років, без залучення цифрових засобів регулювання та автоматизованого контролю процесу горіння. У цьому контексті актуальною є реалізація пілотних проєктів з модернізації міських котелень з використанням комбінацій методів активізації горіння.

Наприклад, на рівні обласних центрів доцільно створити демонстраційні об'єкти на базі типових котелень потужністю 1–2 МВт з використанням генераторів озону, лазерного запалювання, систем автоматизованого регулювання та моніторингу викидів NOx у реальному часі. Реалізація таких рішень потребує взаємодії наукових установ, місцевої влади, виробників обладнання та грантових програм.

Перспективним напрямом також є впровадження цифрових технологій аналізу та управління процесами горіння на основі штучного інтелекту та машинного навчання. У ряді європейських країн (зокрема, у Нідерландах та Австрії) вже діють автоматизовані системи контролю складу продуктів згоряння з алгоритмами самонавчання, які оптимізують подачу повітря в реальному часі. Це дозволяє досягати стабільного коефіцієнта надлишку повітря на рівні 1.02–1.05, знижуючи утворення CO та NOx до мінімальних значень.

В Україні такі системи можна адаптувати до нових або реконструйованих котелень за участі українських ІТ-компаній. Окрему увагу варто приділити освітнім проєктам на базі ЗВО (КНУБА, КПІ, ОНАХТ), де можливе створення навчально-лабораторних стендів для дослідження ефективності активізаторів горіння.

Ще одним перспективним напрямом є розвиток регіональних програм енергоефективності, в межах яких громади зможуть залучати кошти на модернізацію систем теплопостачання через механізми співфінансування. Результатом стане не лише енергетична економія, а й формування локальної компетенції у сфері чистих технологій.

Підсумовуючи, можна зазначити, що перспективи впровадження інноваційних методів активізації горіння є надзвичайно широкими — від технічних рішень на рівні пальників до стратегічних ініціатив державної політики.

У ряді українських регіонів вже є поодинокі приклади впровадження

енергоефективних технологій, які можуть слугувати платформою для масштабування інновацій у галузі активізації горіння:

1. м. Вінниця — у рамках проєкту “Енергоефективне місто” впроваджено систему автоматизованого управління теплопостачанням на базі 34 котелень. Було встановлено погодозалежні регулятори та обладнання, яке дозволяє підтримувати оптимальний режим горіння з динамічною зміною подачі повітря. Економія газу — до 12% за сезон.

2. м. Львів — у межах співпраці з Європейським банком реконструкції та розвитку (ЄБРР) модернізовано низку котелень з установкою частотних перетворювачів і регульованих пальників. Окремі об’єкти мають теплогенератори з попереднім озонуванням повітря. Пілотний проєкт у Сихівському районі показав зниження витрат газу на 8% і зменшення викидів NO_x на 24%.

3. м. Дніпро — у рамках муніципальної програми “Розумне тепло” встановлено мікрокогенераційні модулі, де випробовується система лазерного запалювання у зв’язці з модулем аналізу викидів. Це дозволяє зменшити витрати на запуск обладнання в умовах низьких температур та уникнути зупинок у “пікові” години навантаження.

4. м. Кривий Ріг — у промислових мікрорайонах впроваджуються експериментальні пальники з магнітною активацією повітряної суміші. Хоч результати поки обмежені лабораторними даними, виявлено потенціал для зменшення CO на 15–20% у режимах неповного навантаження.

Ці приклади демонструють, що навіть без масштабних інвестицій можливо локально впроваджувати сучасні методи активізації горіння, адаптуючи їх до існуючих котелень та теплових пунктів. Подібні ініціативи можуть стати основою для регіональних дорожніх карт модернізації теплоенергетики в Україні.

Висновки. Проведений аналіз показав, що процес горіння природного газу у комунальних теплоенергетичних установках супроводжується значними енергетичними втратами та забрудненням довкілля через недосконалість наявних пальникових систем і відсутність регульованої подачі повітря. Це підтверджено як вітчизняними, так і зарубіжними дослідженнями. Сучасні методи активізації горіння, зокрема озонування, лазерне запалювання, плазмохімічна активація, ультразвук і нанокаталіз, мають науково обґрунтовану ефективність і дозволяють підвищити повноту згоряння, зменшити викиди NO_x та CO, а також знизити питомі витрати палива на 4...10%. Найефективнішими виявилися методи озонування повітря та лазерного запалювання, які мають як технічні, так і економічні переваги. З економічної точки зору, найбільш доцільним є впровадження озонного методу, термін окупності якого становить

лише 2–3 місяці. Інші методи мають довший період повернення інвестицій, але забезпечують додаткову надійність та гнучкість системи в умовах зміни навантаження. Для впровадження цих технологій необхідно розробити нормативно-технічну базу, провести випробування і організувати навчання персоналу. Проведений аналіз показує, що модернізація систем комунального теплопостачання за допомогою методів активізації горіння здатна значно знизити залежність від імпортного природного газу, що є стратегічною метою енергетичної безпеки України. Зменшення споживання палива навіть на 5–7% у масштабах країни дорівнює мільярдним щорічним заощадженням. Впровадження інноваційних технологій активізації процесу горіння (озонування, ультразвук, лазерне займання, нанокаталіз) сприяє формуванню нового технічного рівня в галузі теплогенерації, де ключовими параметрами стають не лише ККД, а й екологічні показники: рівень викидів NO_x, CO, CH₄, ступінь повноти згоряння. Аналіз досвіду українських регіонів (Вінниця, Львів, Дніпро, Кривий Ріг) доводить, що навіть за умов обмеженого фінансування можливе успішне впровадження ефективних рішень у галузі спалювання газу. Ці приклади можуть стати основою для формування державної програми з модернізації котелень та створення демонстраційних майданчиків для апробації нових технологій.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження повинні бути зосереджені на чисельному моделюванні процесів горіння з урахуванням нових активаторів, тестуванні їх у реальних умовах, а також на розробці комбінованих систем впливу, що забезпечують максимальну ефективність при мінімальних капіталовкладеннях. Для повномасштабного впровадження в Україні необхідно оновити нормативну базу, розробити технічні регламенти щодо безпеки застосування фізико-хімічних методів впливу на полум'я, а також передбачити державне підтримання пілотних проектів у комунальному секторі. Це дозволить не лише зменшити витрати на імпортний газ, а й наблизить енергетичну систему до стандартів сталого розвитку ЄС. Використання фізико-хімічних методів активізації горіння відповідає цілям сталого розвитку та декарбонізації енергетики України. Перспективи впровадження таких рішень значно зростають за наявності державно-приватного партнерства, участі в міжнародних кліматичних програмах, підтримання з боку місцевої влади та наукових установ. Формування мережі пілотних об'єктів із повним моніторингом техніко-економічних та екологічних ефектів дозволить створити національну платформу енергоефективних рішень у теплотехніці.

References

1. Law C.K. "Combustion Physics." Cambridge Univ. Press, 2010.
2. Turns S.R. "An Introduction to Combustion." 3rd ed. McGraw-Hill, 2012.
3. Glassman I. et al. "Combustion." 5th ed. Academic Press, 2014
4. Warnatz J. et al. "Combustion: Fundamentals." Springer, 2006.
5. Phuoc T.X., White F.P. "Laser-induced spark ignition of CH₄." Air mixtures. Combustion and Flame. Vol. 119, no. 3, 1999, pp. 203–216.
6. Seo A. "Study on the removal of unburned hydrocarbons by ozone." Annual Technical Report Digest, No. 9, 1999, pp. 88–93.
7. Binder F., Kolle R. "Application of ozone generators in heating." Energy and Environment, Vol. 32, 2018, pp. 41–49.
8. Kuo K.K. "Principles of Combustion." 2nd ed. Wiley-Interscience, 2005
9. Rotzoll G. "Methane-Ozone reaction." J. Phys. Chem. Vol. 90, 1986, pp. 320–330.
10. Nakao S. "Magnetic enhancement of methane combustion." J. Combustion Research. Vol. 24, no. 4, 2017, pp. 92–96.
11. Di X., Deng J., Guo M. "Effect of ultrasonic-fed time on combustion behavior and emission formations in a gasoline engine." ACS Omega. Vol. 8, no. 10, 2023, pp. 9054–9064
12. Merritt R.L., Purwar H., Lounnaci K. "Effect of cavitation on velocity in the near-field of a diesel nozzle." ArXiv (Engineering), 2016, arXiv:1601.06843 [physics.flu-dyn]
13. Madhavan S., Muralidhar V., Gangwal S. "Spray and engine performance of cerium oxide nanopowder and carbon nanotubes additives in diesel fuel." Fuel, Vol. 314, 2022, pp. 123–130
14. Le Gal A., Julbe A., Abanades S. "Thermochemical activity of ceria-based oxides for two-step synthetic fuel production." Molecules, Vol. 28, no. 1, 2023, p. e217
15. Bondzyk D.L., Baraniuk O.V., Vorobiov M.V., Cherniavskyi M.V., Kosiachkov O.V. "CFD-modeliuvannia krytychnykh vidkhylen protsesiv horinnia u kotlakh z fakelnym horinniam (TPP-210A), chastyna 1: pobudova rozrakhunkovoi modeli kotla." Naukovyi visnyk NHU, no. 2, 2024, pp. 52–59.

UDC 696.2:504.1

post-graduate student **Yaroslav Shvets**

shvets198507@gmail.com, ORCID: 0009-0008-0997-6989

Kyiv National University of Construction and Architecture

MODERN AND PROSPECTIVE TECHNOLOGIES FOR COMBUSTION ENHANCEMENT IN MUNICIPAL HEAT POWER ENGINEERING

Abstract. *The article investigates the theoretical foundations and applied aspects of gas fuel combustion in municipal heat energy equipment. Particular attention is paid to the analysis of factors that determine combustion completeness, including temperature conditions, the degree of flow turbulence, uniformity of fuel–air mixing, composition of the fuel–air mixture, and flame aerodynamics. In the context of improving the efficiency and environmental safety of heat supply systems, modern methods of combustion enhancement are examined. Among them are laser ignition as a means of ensuring stable and controlled initiation of combustion, the use of electric and magnetic fields to influence ionized combustion products and accelerate oxidation reactions, and pre-ozonation of the fuel–air mixture to enrich it with a strong oxidizing agent. The article presents the results of a techno-economic analysis of the feasibility of implementing these technologies in the operation of municipal heat-generating systems. It is substantiated that the application of innovative approaches to combustion control makes it possible not only to increase energy efficiency but also to significantly reduce the level of harmful emissions, particularly nitrogen oxides (NO_x), which are among the main air pollutants. Furthermore, the implementation of such technologies contributes to the reduction of natural gas consumption and operating costs, while improving the sustainability of heat supply infrastructure. The paper also emphasizes the prospects for further research aimed at optimizing gas combustion parameters, integrating adaptive control systems, and aligning combustion technologies with modern standards of environmental protection, energy transition, and urban development. Special attention is also given to the potential integration of these technologies with renewable energy sources and intelligent thermal regulation systems, which may become crucial components of future energy-efficient and low-emission heating networks.*

Keywords: combustion, gas fuel, heat energy, combustion enhancement, ozone, laser ignition, NO_x, electric field.