

Рачинський А.Ю.

<https://orcid.org/0009-0006-2120-5541>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Баранюк О.В.

<https://orcid.org/0000-0001-6008-6465>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Онисько А.І.

<https://orcid.org/0000-0001-7178-1417>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Пікенін О.О.

<https://orcid.org/0000-0003-2602-4708>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МОДЕЛЮВАННЯ ТОПОЧНИХ ПРОЦЕСІВ У КОТЛІ ДКВР-10-13 ПРИ СПАЛЮВАННІ БІОГЕННОГО ПАЛИВА НА ЗМІННИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ

У статті вирішено актуальну науково-технічну задачу щодо підвищення ефективності та екологічної безпеки експлуатації парових котлів типу ДКВР в умовах декарбонізації енергетики України. Метою дослідження є встановлення закономірностей зміни теплотехнічних та екологічних показників котла ДКВР-10-13 при переході на біогаз у широкому діапазоні регулювання теплової потужності (100%, 80%, 60% та 40% від номінальної). Об'єктом дослідження виступають процеси тепломасообміну, горіння та формування напружено-деформованого стану в елементах котла при використанні альтернативного палива. Методологія роботи базується на чисельному CFD-моделюванні в середовищі ANSYS Student із застосуванням моделей турбулентності Realizable $k-\epsilon$ та турбулентно-хімічної взаємодії Eddy-Dissipation Concept (EDC). Для аналізу використано реальний склад біогазу Бортницької станції аерації (Київ) із вмістом метану 67,76% та діоксиду вуглецю 31%. У роботі розраховано стехіометричні співвідношення та граничні умови для обох видів палива, враховуючи, що для спалювання біогазу потрібно на 32% менше повітря, ніж для природного газу. Наукова новизна результатів полягає в ідентифікації змін у структурі факела та емісії забруднюючих речовин при глибокому розвантаженні агрегату. Встановлено, що присутність баластного CO_2 у біогазі знижує пікові температури на 100–150 К, що призводить до суттєвого пригнічення генерації термічних NO_x на всіх режимах навантаження. Доведено, що при зниженні потужності до 40% забезпечується повне вигорання метану в межах першої третини паливної, що підтверджує високу маневровість модернізованих пальників ГМГ-5. Виявлено ефект «розмиття» температурного ядра біогазового факела, що сприяє більш рівномірному розподілу локальних теплових потоків на екрани та знижує ризики термічних перекосів трубної системи. Практичне значення роботи полягає в обґрунтуванні вуглецево-нейтрального переведення котлів ДКВР на біогаз із дотриманням нормативів Директиви 2010/75/EU та створенні бази для уточнення розрахунків залишкового ресурсу барабанів.

Ключові слова: котли ДКВР-10-13, біогаз, CFD-моделювання, оксиди азоту (NO_x), маневровість, температурне поле, тепловий потік, декарбонізація.

Постановка проблеми. На сучасному етапі розвитку енергетики України найважливішим питанням залишається стрімке зростання вартості природного газу порівняно з електричною енергією. Як зазначають фахівці Біоенергетичної асоціації України [1], ця тенденція суттєво знижує економічну доцільність використання традиційного газу в енергогенерувальних установках. Підвищення енергоефективності та раціональне використання паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) є стратегічним завданням для забезпечення енергетичної безпеки країни. Згідно з аналітичними звітами Сапегіна О., Гелетуки Г. та ін. [2], реалізація «Революційного сценарію» розвитку галузі передбачає збільшення частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у загальному кінцевому споживанні до 91% до 2050 року, де біогазові установки відіграють роль не лише генерувальних потужностей, а й високоефективних очисних споруд.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Технологічні та теплофізичні аспекти використання біогазу. Біогаз є продуктом анаеробного розкладання біомаси, що відбувається за участю гідролітичних, кислотоутворюючих та метаноутворюючих бактерій. Склад палива варіюється в межах: метан (CH_4) – 50...87%, вуглекислий газ (CO_2) – 13...50%. Досвід таких лідерів галузі, як Данія та Німеччина, підтверджує доцільність диверсифікації паливної бази за рахунок агропромислових відходів. Проте перехід на біогаз потребує перегляду класичних підходів до проектування обладнання. Автори [3] довели, що теплофізичні властивості продуктів згоряння біогазу відрізняються від природного газу на 4...6%, що за відсутності корекції стандартних методик розрахунку призводить до суттєвого завищення температури відхідних газів та перевитрати палива.

Контроль викидів оксидів азоту є пріоритетним завданням через їх високу токсичність порівняно з монооксидом вуглецю. Дослідження спалювання біогазових сумішей (76% CH_4 та 24% CO_2) на котлах типу ДКВР-6.5-13, проведені авторами [4], підтвердили можливість стабільного зниження рівня NO_x до 63...76 мг/Нм³, що відповідає сучасним стандартам ЄС. Крім того, автори [5] на основі багаторічних досліджень на котлах ДКВР 10-13 та ГМ-50 запропонували метод впорскування пари в зону горіння, що дозволяє досягти 30% зниження емісії NO_x без втрати ККД агрегату, а застосування рециркуляції димових газів ($\tau = 17...30\%$) забезпечує ефективність деноксифікації до 75%.

Сучасний аналіз складних процесів у паливних базується на методах обчислювальної гідродинаміки (CFD). Автори [6], застосовуючи моделі турбулентності k- ω SST, виявили, що перехід до киснево-парового режиму ($\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$) підвищує однорідність теплового потоку на стінках на 129,9%. Термодинамічний аналіз, проведений авторами [7], вказує на те, що збільшення вмісту CO_2 у біогазі супроводжується зростанням ексергетичних втрат через неповне згоряння. Водночас автори [8] обґрунтували переваги рециркуляції відпрацьованих газів (EGR) для реалізації режиму низькотемпературного горіння (MILD), що мінімізує термічні напруження стінок камери. Питання спільного спалювання (cofiring) досліджено в роботах [9], а для котлів із киплячим шаром [10] визначили найбільш ефективну схему подачі біогазу через перший ряд отворів вторинного повітря.

Обґрунтування напряму дослідження. Узагальнюючи результати вищезазначених досліджень, можна констатувати, що попри значний прогрес у вивченні кінетики горіння біогазу, питання комплексного впливу переходу на альтернативне паливо для котлів серії ДКВР радянського зразка залишається розкритим не в повній мірі. Зокрема, потребує уточнення характер розподілу локальних теплових потоків на екрани паливні при роботі на біогазі зі значним вмістом баластних газів, що безпосередньо впливає на надійність трубної системи та прогнозований 15-річний ресурс барабанів-сепараторів [10]. З огляду на це, у даній роботі на основі верифікованих підходів [4] та екологічних рішень [11], реалізовано власну тривимірну CFD-модель котла ДКВР-10-13. Це дозволило провести поглиблений порівняльний аналіз процесів, що мають місце в паливній котла, при спалюванні природного газу та біогазу, враховуючи не лише емісію NO_x , а й зміну термомеханічного навантаження на елементи конструкції, що є критично важливим для продовження ресурсу обладнання в умовах декарбонізації енергетики України.

Постановка завдання. Метою статті є встановлення закономірностей зміни теплотехнічних та екологічних показників котла ДКВР-10-13 при переході на біогазове паливо в широкому діапазоні регулювання теплової потужності (від 40% до 100% номінального навантаження) для забезпечення надійної та безперебійної експлуатації обладнання в умовах декарбонізації енергетики.

Метод дослідження – CFD-моделювання основних характеристик процесів горіння під час спалювання метану і біогазу в комп'ютерній моделі

паливні котла ДКВР-10-13 в штатних і модернізованих пальниках ГМГ-5. Комп'ютерне моделювання виконувалося в середовищі програмного комплексу ANSYS Student, що є абсолютно безкоштовним (з 2015 року) і призначеним для вирішення ознайомлювальних і освітніх задач в академічному середовищі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести порівняльний CFD-аналіз процесів, що мають місце в паливні котла при спалюванні природного газу та біогазу з урахуванням зміни масових витрат палива і повітря, необхідних для підтримки заданих режимів навантаження (100, 80, 60 та 40%).

2. Дослідити динаміку температурних полів та концентрацій компонентів (CH_4 , CO_2 , CO) у паливні котла при зниженні теплового навантаження, з метою визначення меж стабільності горіння низькокалорійного біогазу.

3. Оцінити екологічну ефективність переведення котла на біогаз шляхом моделювання локальної та інтегральної емісії оксидів азоту (NO_x) на різних режимах роботи, враховуючи пригнічення термічного механізму їх утворення при зниженні пікових температур.

4. Встановити вплив варіативності навантаження на розподіл локальних теплових потоків на екранні поверхні, що дозволить ідентифікувати зони потенційного термічного перекоосу та оцінити зміну теплової ефективності паливні при роботі на біогазі.

5. Обґрунтувати можливість експлуатації котла на низьких навантаженнях (40...60%) без критичного зниження повноти згоряння та зі збереженням нормативних показників якості пари, що є важливим для маневрових режимів роботи муніципальних котельень.

Об'єктом дослідження є процеси тепломасообміну, горіння та формування напружено-деформованого стану в елементах котельних агрегатів промислової та муніципальної енергетики (зокрема котлів типу ДКВР та пелетних котлів малої потужності) при їх експлуатації на альтернативних видах палива.

Предметом дослідження є пошук взаємозв'язку між складом біопалива, конструктивними параметрами пальників, температурними полями в паливні та показниками екологічної безпеки NO_x .

Виклад основного матеріалу. Представлений в статті аналіз доступної літератури свідчить, що біогаз може а вже активно використовується як паливо для котлів. Його особливістю є знижений

(60...75%) вміст метану (порівняно з природним газом) оскільки в його складі наявний діоксид вуглецю в кількості (25...40%). Завдяки цьому, спалювання біогазу відбувається з мінімальним утворенням окислів азоту [3]. Для моделювання використовувався склад біогазу очисних споруд Бортницької станції аерації в м. Києві. Цей біогаз містить 67,76% CH_4 ; 31% CO_2 ; 0,44% O_2 ; 0,57% N_2 ; 0,13% H_2 ; 0,04% H_2S .

Моделювання спалювання біогазу в ANSYS Fluent є складнішим за моделювання чистого метану, оскільки біогаз містить значну частку вуглекислого газу (CO_2), що впливає на температуру факела, кінетику реакцій та емісію NO_x . Для вирішення цієї проблеми в представленій роботі використана модель горіння (Species Model) для моделювання детальної кінетики та викидів NO_x . Склад суміші задавався за допомогою Reaction Constants. Турбулентно-хімічну взаємодію (Turbulence-Chemistry Interaction) для точних розрахунків моделювали за допомогою Eddy-Dissipation Concept. Для моделювання турбулентності вибрана Realizable k-ε модель, оскільки в роботі використовувались пальники із завихренням, а згадана модель забезпечує достатньо гарний баланс між точністю та ресурсами.

Докладно, математичний опис процесу тепломасообміну та застосованих моделей турбулентно-хімічної взаємодії горіння біогазу в паливні котла ДКВР-10-13 представлено в роботі [12].

Граничні умови та параметри моделювання, такі як і в роботах [13-17]. В даній роботі використано наступні параметри розрахункової схеми:

1. Вхід палива (Fuel Inlet). Для обох випадків задано граничну умову типу «Mass Flow Inlet» (масова витрата на вході). Природний газ: Склад прийнято як 100% CH_4 (спрощена модель). Нижча теплота згоряння $Q_{\text{н}}^{\text{p}} = 35,8$ МДж/нм³. Біогаз: Нижча теплота згоряння суміші становить приблизно 21,5 МДж/нм³. Згідно заданого складу розраховані масові частки (Mass Fractions) і задані в якості граничних умов. Температура палива 313 К (з урахуванням підігріву).

2. Подача повітря (Air Inlet) Гранична умова задана як «Velocity Inlet» (швидкість на вході) або «Mass Flow Inlet». Коефіцієнт надлишку повітря (α): Для обох випадків прийнято рівним 1,05. Склад повітря: $Y_{\text{O}_2} = 0,233$; $Y_{\text{N}_2} = 0,767$. Температура: Повітря подається після повітропідігрівника з температурою 423 К (150 °С). Оскільки біогаз містить менше метану на одиницю об'єму палива, масова витрата повітря для біогазу при однаковій витраті суміші палива повинна бути перерахована

відповідно до стехіометричного відношення для забезпечення стабільного горіння.

3. Стінки паливні (Walls). Для стінок екранних труб задано граничну умову типу «Wall» із тепловими характеристиками:

Тепловий режим: Задано фіксовану температуру стінки або коефіцієнт теплопередачі. Враховуючи робочий тиск у барабані 3,9 МПа, температура насичення становить ≈ 250 °С. Emissivity (Ступінь чорноти): Для зашлакованих стінок прийнято $\varepsilon = 0,8 \dots 0,85$.

4. Вихід димових газів (Pressure Outlet). На виході з паливної (у площині флестону) встановлено умову «Pressure Outlet»: Static Pressure: 0 Па (надлишковий тиск відносно атмосферного). Backflow Temperature: 1200...1300 К (температура газів на виході для запобігання проблемам зі збіжністю при зворотному тоці).

Витрата газу через пальник V_T автори визначали за формулою, $\text{м}^3/\text{с}$:

$$V_T = \frac{Q_n}{Q_n^p \cdot N \cdot \eta}, \quad (1)$$

де Q_n – номінальна теплова потужність пальника, кВт; Q_n^p – нижча теплота згоряння газу, кДж/м³; N – кількість однотипних пальників, що приймаються до встановлення з однаковою витратою газу (в представленій роботі використано 4-ри пальники розташованих на фронтальних стінах котла); η – ККД пальника.

Необхідна витрата повітря через пальник розраховувалась за формулою, $\text{м}^3/\text{с}$:

$$V_n = \alpha \cdot V_z \cdot V_n^0, \quad (2)$$

де α – коефіцієнт надлишку повітря, що подається в топкову камеру. При горінні газового палива прийнятий рівним 1,05; V_n^0 – витрата повітря, необхідна для горіння 1 м³ газу, м³/м³. Для точного налаштування граничної умови Air Inlet в ANSYS Fluent необхідно розрахувати теоретично необхідний б'єм повітря V^0 для повного спалювання 1 м³ біогазу.

В роботі виконано розрахунок необхідної кількості кисню для кожного горючого компонента біогазу:

Для метану ($\text{CH}_4 = 67,7\%$): На 1 моль CH_4 потрібно 2 моль O_2 :

$$V_{\text{O}_2, \text{CH}_4} = 0,677 \cdot 2 = 1,354, \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ палива}, \quad (3)$$

Для водню ($\text{H}_2 = 0,13\%$): На 1 моль H_2 потрібно 0,5 моля O_2 :

$$V_{\text{O}_2, \text{H}_2} = 0,013 \cdot 0,5 = 0,00065, \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ палива}, \quad (4)$$

Для сірководню ($\text{H}_2\text{S} = 0,04\%$): На 1 моль H_2S потрібно 1,5 моля O_2 :

$$V_{\text{O}_2, \text{H}_2\text{S}} = 0,0004 \cdot 1,5 = 0,0006, \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ палива}, \quad (5)$$

Біогаз уже містить 0,44% кисню який потрібно враховувати в паливі ($\text{O}_2 = 0,0044 \text{ м}^3/\text{м}^3$), тому кількість кисню, який потрібно подати ззовні ($V_{\text{O}_2}^{\text{ext}}$), становить:

$$V_{\text{O}_2}^{\text{ext}} = (1,354 + 0,00065 + 0,0006) - 0,0044 = 1,35085 \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ палива}, \quad (6)$$

Враховуючи, що вміст кисню в повітрі становить 21%:

$$V^0 = \frac{1,35085}{0,21} \approx 6,433 \text{ м}^3 \text{ повітря на } 1 \text{ м}^3 \text{ біогазу}, \quad (7)$$

При моделюванні в Fluent для котлів типу ДКВР зазвичай приймають коефіцієнт надлишку повітря $\alpha = 1,05$. В роботі вибрано $\alpha = 1,05$, то дійсна витрата повітря складе:

$$V^{\text{real}} = 6,433 \cdot 1,05 = 6,755 \text{ м}^3 \text{ повітря на } 1 \text{ м}^3 \text{ палива}, \quad (8)$$

Порівняно з природним газом (де $V^0 \approx 9,5 \text{ м}^3/\text{м}^3$), для біогазу потрібно на 32% менше повітря. Це означає, що при модернізації котла ДКВР-10-13 під біогаз навантаження на дуттьові вентилятори зменшиться, але швидкість виходу суміші з пальника може змінитись, що вплине на довжину факела.

В роботі, навантаження котельного агрегату становило 100, 80, 60 і 40 відсотків від номінального навантаження. Для забезпечення такого навантаження, змінювались витрати газу і повітря, розраховані згідно формул (1 – 8).

Обговорення отриманих результатів. Результати моделювання представлені у вигляді розподілів окислів азоту, масових долей реагуючих компонентів реакції окислення, розподілів температур в поздовжньому перерізі котла, що проходить через пальник (рис. 1-5). А також розподілів локальних теплових потоків в на стінках котельного агрегату (рис. 6) для випадків спалювання як біогазу так і для природного газу.

Аналіз емісії окислів азоту (NO_x) (рис. 1) свідчить, що при спалюванні природного газу (рис. 1б) зони максимальної концентрації NO_x значно більші, а пікові значення вищі, ніж при спалюванні біогазу (рис. 1а). Це пояснюється присутністю в біогазі баластного CO_2 , який знижує адиабатну температуру полум'я, пригнічуючи механізм утворення термічних NO_x .

Вплив навантаження характеризується тим, що для обох видів палива спостерігається чітка закономірність: зі зниженням навантаження від 100% до 40% концентрація NO_x монотонно зменшується. Це пов'язано зі зменшенням загального тепловиділення в топці та зниженням максимальних температур у ядрі факела. При 40% наванта-

женні зона утворення NO_x стає мінімальною та зосереджується лише у безпосередній близькості до пальника.

Розподіл масових часток метану (CH_4) (рис. 2) свідчить про те, що метановий струмінь при спалюванні природного газу (рис. 2б) виглядає більш концентрованим. У випадку біогазу (рис. 2а) початкова масова частка CH_4 у струмені нижча через розбавлення палива вуглекислотою, проте через більшу об'ємну витрату (необхідну для компенсації нижчої калорійності) струмінь біогазу має більшу далекобійність. Повнота згоряння: На

всіх режимах (100...40%) метан повністю витрачається в межах першої третини простору паливни. Це свідчить про високу якість змішування палива з повітрям та ефективність пальників навіть при переході на низькокалорійний біогаз. Зі зниженням навантаження довжина зони наявності незгорілого метану скорочується.

Розподіл вуглекислого газу (CO_2) (рис. 3) свідчить, що при спалюванні біогазу (рис. 3а) висока концентрація CO_2 спостерігається вже на зрізі пальника оскільки він є компонентом палива. При спалюванні природного газу (рис. 3б)

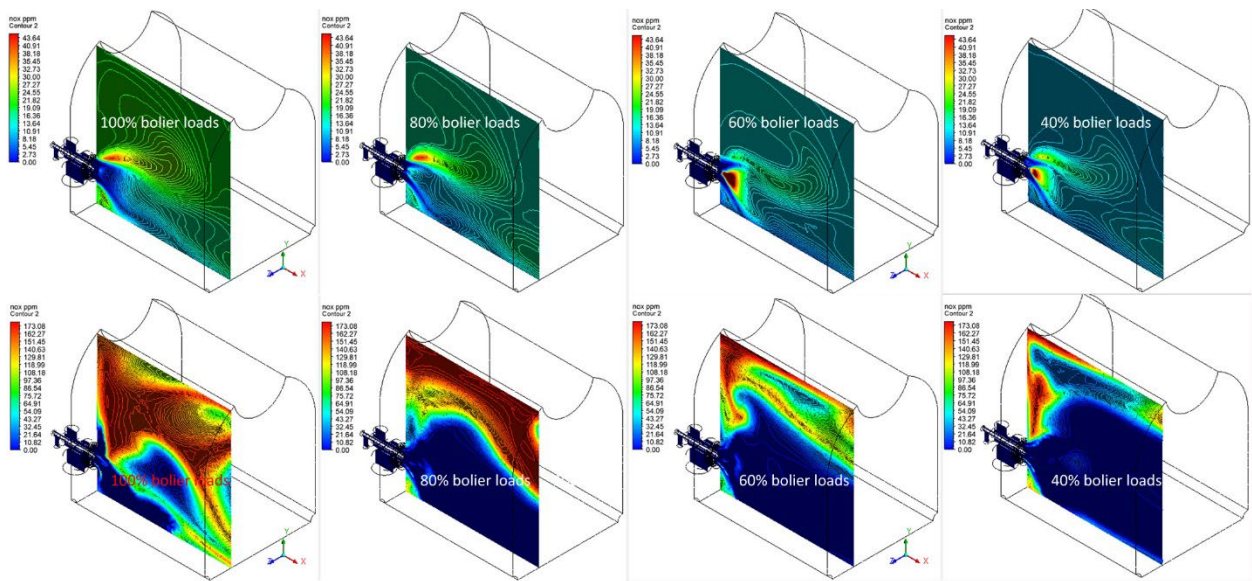


Рис. 1. Розподіл окислів азоту в перерізі паливни котла ДКВР-10-13 у випадку спалювання біогазу (а) та природного газу

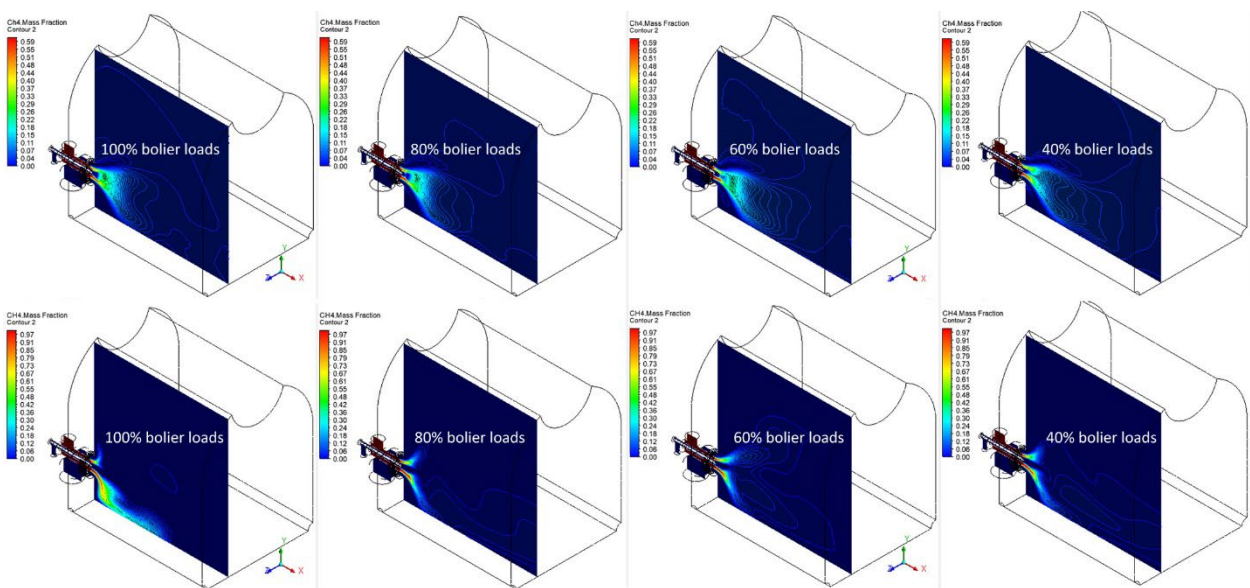


Рис. 2. Розподіл масових часток метану в перерізі паливни котла ДКВР-10-13 у випадку спалювання біогазу (а) та природного газу

CO₂ з'являється лише в зоні реакції як продукт окислення вуглеводнів. Загальний рівень CO₂ в паливній котла при спалюванні біогазу значно вищий. Зі зниженням навантаження розподіл CO₂ стає більш рівномірним по всьому об'єму топки за рахунок зменшення інтенсивності турбулентних потоків та кращого заповнення простору паливними продуктами згоряння.

Розподіл монооксиду вуглецю (CO) характерний тільки для випадку спалювання природного газу. Крім того, рис. 4 свідчить, що CO є індикатором проміжних стадій горіння. Максимальні концентрації спостерігаються в ядрі факела, де відбувається інтенсивний розпад молекул CH₄ за умов локального дефіциту кисню. Завершення реакцій: До виходу з топки концентрація CO падає практично до нуля, що підтверджує відсутність хімічного недопалу. При зниженні навантаження (від а до г) зона наявності CO стискається, що вказує на швидше завершення окислювальних реакцій.

Температурні поля димових газів (рис. 5) свідчать, що максимальні температури при спалюванні природного газу (рис. 5б) на 100...150 °C вищі, ніж для біогазу (рис. 5а). Біогазовий факел має більш "розмите" температурне ядро. Динаміка навантаження: При 100% навантаженні (а) зона високих температур займає значну частину топки. При переході до 40% температурне поле стає «холоднішим», а градієнти температур — менш різкими. Це безпосередньо впливає на зниження генерації NO_x, про що свідчив рис. 1.

Локальні теплові потоки на стінках котла (рис. 6) свідчать, що при спалюванні біогазу (рис. 6а) теплові потоки розподілені більш рівномірно по поверхні екранів. Хоча пікові значення потоків нижчі за природний газ (рис. 6б), підвищений вміст трьохатомних газів (CO₂) у продуктах згоряння біогазу інтенсифікує радіаційний теплообмін.

Таким чином, високі локальні теплові потоки при спалюванні природного газу на 100% наван-

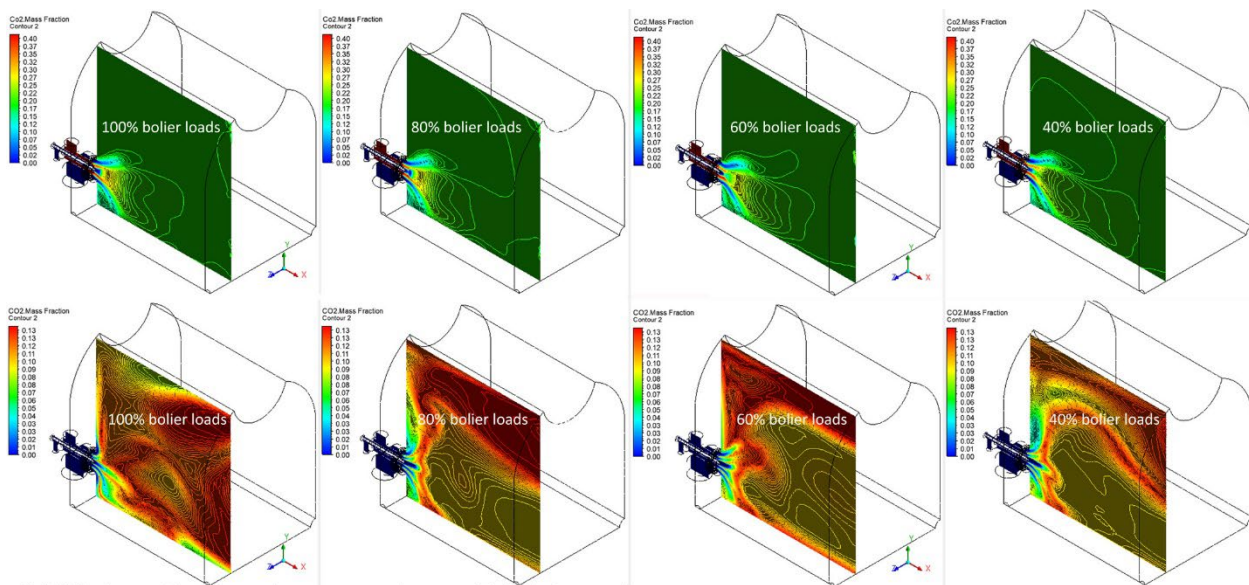


Рис. 3. Розподіл масових часток вуглекислого газу в перерізі паливній котла ДКВР-10-13 у випадку спалювання біогазу (а) та природного газу

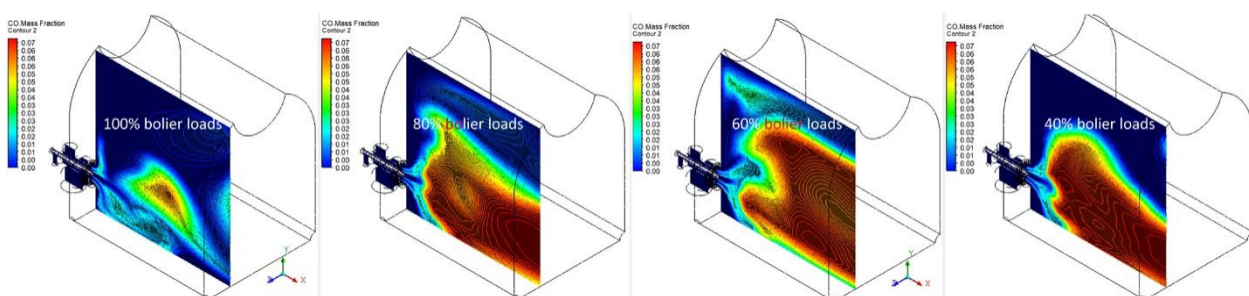


Рис. 4. Розподіл масових часток монооксиду вуглецю в перерізі паливній котла ДКВР-10-13 у випадку спалювання природного газу при 100%-му (а), 80%-му (б), 60%-му та 40 %-му навантаженні

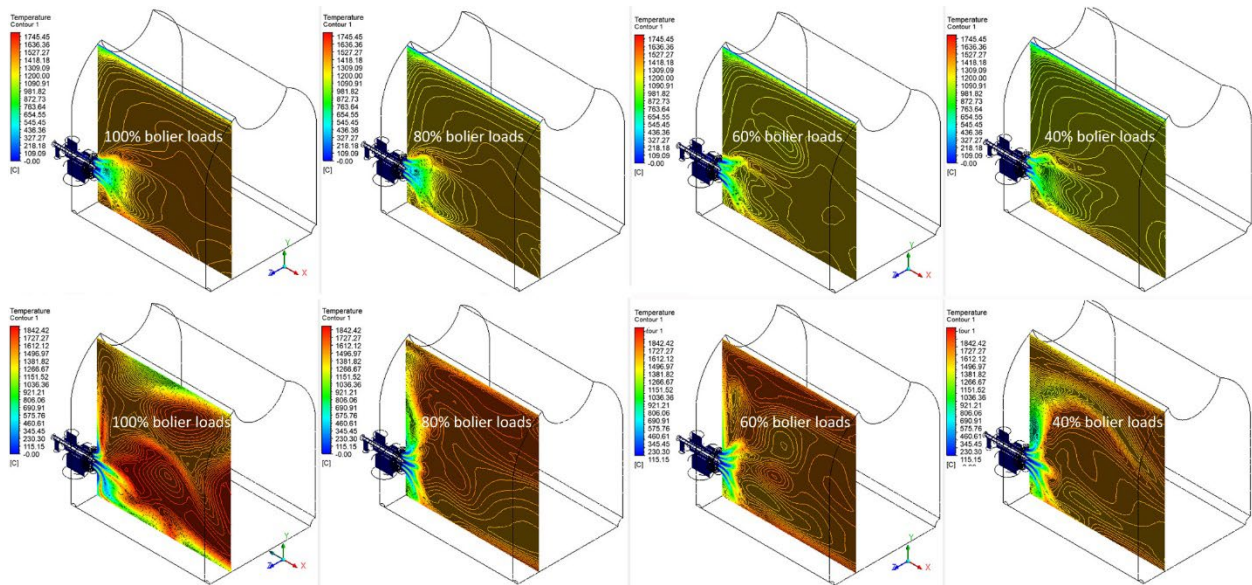


Рис. 5. Розподіл температур димових газів в перерізі паливні котла ДКВР-10-13 у випадку спалювання біогазу (а) та природного газу

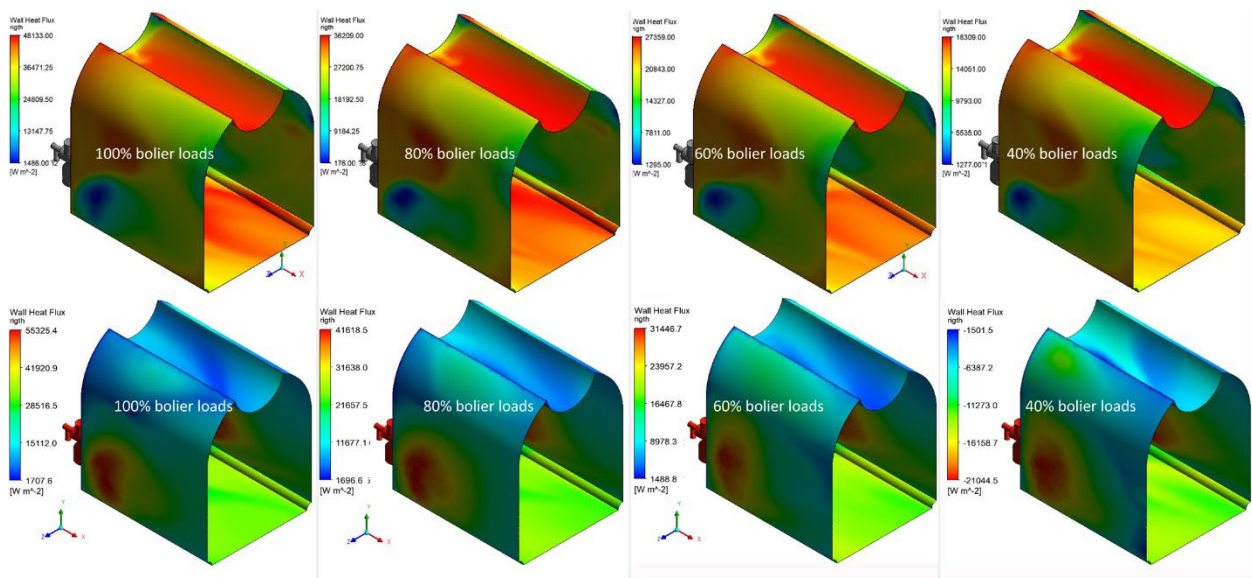


Рис. 6. Розподіл локальних теплових потоків на стінках паливні котла ДКВР-10-13 у випадку спалювання біогазу (а) та природного газу

таженні створюють ризики локальних перегрівів труб. Біогаз забезпечує більш м'який тепловий режим роботи екранних поверхонь. Зі зменшенням навантаження інтенсивність теплових потоків падає пропорційно падінню температур у паливні котла ДКВР-10-13.

Висновки. На основі проведеного комплексу чисельних досліджень теплотехнічних та екологічних характеристик котла ДКВР-10-13 при спалюванні природного газу та біогазу в діапазоні навантажень 40–100 % від номінального, встановлено наступне:

1. Стабільність горіння та повнота згорання: Аналіз розподілу масових часток метану (CH_4) та монооксиду вуглецю (CO) підтвердив, що при використанні штатних модернізованих пальників ГМГ-5 забезпечується стабільне займання та повне вигорання біогазу на всіх досліджених режимах. Навіть при глибокому розвантаженні до 40 % зона активних хімічних реакцій залишається зосередженою в межах першої третини паливні, що свідчить про високу маневровість агрегату на альтернативному паливі.

2. Екологічна ефективність (NO_x): Доведено, що перехід на біогаз забезпечує суттєве

зниження емісії оксидів азоту на всіх режимах навантаження. При 100 % навантаженні пікові концентрації NO_x падають завдяки баластному CO_2 , який знижує температуру ядра факела на 100...150 °С. При зниженні навантаження до 40 % спостерігається додаткове падіння концентрації NO_x внаслідок загального зменшення теплової напруги об'єму паливної, що дозволяє виконувати вимоги Директиви 2010/75/EU без використання систем рециркуляції.

3. Тепловий стан та надійність: Встановлено, що робота на біогазі супроводжується «розмиттям» температурного ядра та зростанням далекобійності факела через більшу об'ємну витрату палива. Це призводить до більш рівномірного розподілу локальних теплових потоків на стінках паливної порівняно з природним газом. Такий характер теплообміну знижує ризики локальних перегрівів екранних труб, проте вимагає контр-

ольо температури газів поблизу заднього екрана на номінальних режимах.

4. Вуглецевий баланс та ККД: Розрахунково підтверджено, що попри зростання прямої емісії CO_2 на 66 % (92,03 кг/ГДж проти 55,22 кг/ГДж для метану) через нижчу калорійність біогазу, паливо є вуглецево-нейтральним згідно з методологією LCA. Підвищена концентрація CO_2 у продуктах згоряння інтенсифікує радіаційний теплообмін, що частково компенсує зниження температури факела та дозволяє підтримувати ККД котла на високому рівні в усьому діапазоні регулювання (40...100 %).

5. Практична реалізація: Отримані результати чисельного моделювання (зокрема, розподіли температур та теплових потоків) є базою для уточнення методик розрахунку залишкового ресурсу барабанів котлів ДКВР, враховуючи фактичну термомеханічну історію навантажень при роботі на біогенному паливі.

Список літератури:

1. Біоенергетична асоціація України. Динаміка зростання біогазових потужностей в Україні : аналітична доповідь. Київ, 2022. 42 с.
2. Сапегін О., Гелетуха Г. та ін. Аналіз розвитку відновлюваних джерел енергії в Україні до 2050 року : звіт. Київ, 2021. 84 с.
3. Трубочев М. А., Белоусов В. В. Вплив термофізичних властивостей продуктів згоряння біогазу на теплові розрахунки водогрійних котлів. *Вісник БДТУ ім. В.Г. Шухова*. 2024. № 9 (10). С. 63–71. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-63-71.
4. Дубровський В. В., Шнирков П. В., Кузнецов О. Л. Дослідження викидів оксидів азоту при спалюванні суміші метану та вуглекислого газу в котлі ДКВР-6.5-13. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2022. № 4. С. 60–67. DOI: 10.33070/etars.4.2022.06.
5. Szkarowski A., Janta-Lipińska S., Gawin R. Reducing emissions of nitrogen oxides from dkvr boilers. *Rocznik Ochrona Środowiska*. 2016. Vol. 18, no. 1. P. 565–578.
6. Hosseini S. E., Bagheri G. Numerical modeling of biogas diffusion flame in a swirl-stabilized boiler under oxy-fuel conditions. *Energy*. 2022. Vol. 254. DOI: 10.1016/j.energy.2022.125206.
7. Karatas S., Derbentli T. Exergetic evaluations of oxy-biogas combustion in an adiabatic furnace. *International Journal of Thermodynamics*. 2023. Vol. 26, no. 2. DOI: 10.5541/ijot.1587174.
8. Yusaf T., Al-Ashaab A. CFD modeling of MILD combustion using biogas with exhaust gas recirculation (EGR). *Journal of Physics: Conference Series*. 2024. Vol. 2688. 012023. DOI: 10.1088/1742-6596/2688/1/012023.
9. Liu H., Zhang J., Wu S. et al. Numerical simulation of biogas and coal co-combustion in a 300 MW tangential furnace. *ACS Omega*. 2024. Vol. 9, no. 12. DOI: 10.1021/acsomega.4c00885.
10. Saeed M., Khan S. Investigation of optimal biogas injection location in a bubbling fluidized bed boiler. *CFD Letters*. 2024. Vol. 17, no. 6. P. 69–80. DOI: 10.37934/cfdl.17.6.6980.
11. Szkarowski A., Janta-Lipińska S. Development of steam injection technology for NO_x reduction in DKVR 10-13 boilers. *E3S Web of Conferences*. 2018. Vol. 44. 00056. DOI: 10.1051/e3sconf/20184400056. Kuo K. K. Principles of Combustion. 2nd ed. New York : John Wiley & Sons, 2005. 732 p.
12. Рачинський А.Ю. Баранок О. В., Пікенін О. О., Тихоход В.О. Удосконалення показників надійності та екологічної безпеки котла дквр-10-13 при диверсифікації паливної бази. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2026. Т. 37 (76), № 2. С. ???–???
13. Peters N. Turbulent Combustion. Cambridge : Cambridge University Press, 2000. 304 p. (Cambridge Monographs on Mechanics).
14. Turns S. R. An Introduction to Combustion: Concepts and Applications. 3rd ed. New York : McGraw-Hill Education, 2011. 736 p.
15. Bird R. B., Stewart W. E., Lightfoot E. N. Transport Phenomena. Revised 2nd ed. New York : John Wiley & Sons, 2007. 928 p.

16. Versteeg H. K., Malalasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. 2nd ed. Harlow : Pearson Education Limited, 2007. 517 p.

17. ANSYS Fluent Theory Guide. Release 2024 R1. Canonsburg : ANSYS, Inc., 2024. 914 p.

Rachynskiy A.Yu., Baranyuk O.V., Onysko A.I., Pikenin O.O. MODELING OF FIRE PROCESSES IN THE DKVR-10-13 BOILER WHEN COMBUSTING BIOGENIC FUEL AT VARIABLE OPERATING MODES

The article solves a pressing scientific and technical problem of increasing the efficiency and environmental safety of steam boilers of the DKVR type in the conditions of decarbonization of the Ukrainian energy sector. The purpose of the study is to establish the patterns of changes in the thermal and environmental indicators of the DKVR-10-13 boiler when switching to biogas in a wide range of thermal power regulation (100%, 80%, 60% and 40% of the nominal). The object of the study is the processes of heat and mass transfer, combustion and the formation of a stress-strain state in the boiler elements when using alternative fuel. The methodology of the work is based on numerical CFD modeling in the ANSYS Student environment using the Realizable $k-\epsilon$ turbulence models and the Eddy-Dissipation Concept (EDC) turbulent-chemical interaction. The real composition of biogas from the Bortnytsia aeration station (Kyiv) with a methane content of 67,76% and carbon dioxide of 31% was used for the analysis. The work calculates stoichiometric ratios and boundary conditions for both types of fuel, taking into account that 32% less air is required for biogas combustion than for natural gas. The scientific novelty of the results lies in the identification of changes in the structure of the flare and the emission of pollutants during deep unloading of the unit. It has been established that the presence of ballast CO_2 in biogas reduces peak temperatures by 100–150 K, which leads to a significant suppression of thermal NO_x generation at all load modes. It has been proven that when the power is reduced to 40%, complete methane burnout is ensured within the first third of the fuel, which confirms the high maneuverability of the modernized HMG-5 burners. The effect of “blurring” the temperature core of the biogas flare has been revealed, which contributes to a more uniform distribution of local heat flows to the screens and reduces the risks of thermal distortions of the pipe system. The practical significance of the work lies in substantiating the carbon-neutral conversion of DKVR boilers to biogas in compliance with the standards of Directive 2010/75/EU and creating a basis for specifying calculations of the residual resource of separator drums.

Keywords: DKVR-10-13 boilers, biogas, CFD modeling, nitrogen oxides (NO_x), maneuverability, temperature field, heat flow, decarbonization.

Дата першого надходження статті до видання: 24.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026