

УДК 536.24:533.6.011
DOI DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.2.2/12>

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»

Тихоход В.О.

<https://orcid.org/0000-0002-1525-4770>
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»

УДОСКОНАЛЕННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ТА ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ КОТЛА ДКВР-10-13 ПРИ ДИВЕРСИФІКАЦІЇ ПАЛИВНОЇ БАЗИ

У статті розглянуто актуальну проблему модернізації котельного обладнання промислової та комунальної енергетики України в умовах критичного фізичного зносу та необхідності виконання екологічних директив ЄС щодо декарбонізації. Об'єктом дослідження є процеси тепломасообміну в паливній котлі ДКВР-10-13 при переході з природного газу на біогаз. Методом чисельного CFD-моделювання в середовищі ANSYS проведено порівняльний аналіз процесів, що мають місце в паливній котлі при спалюванні метану та багатокомпонентного біогазу (67,76% CH₄, 31% CO₂). Наукова новизна роботи полягає у встановленні взаємозв'язку між баластною складовою палива, структурою температурних полів та інтенсивністю генерації оксидів азоту. Математичну модель реалізовано на основі рівнянь RANS, доповнених моделлю турбулентності Realizable k-ε та моделлю хімічної взаємодії Eddy-Dissipation Concept (EDC), що дозволило врахувати вплив H₂ та H₂S на кінетику горіння. Встановлено, що використання біогазу призводить до «розмиття» ядра факела та зниження пікових температур на 100...150 °С, що забезпечує стабільну деноксифікацію продуктів згорання без впровадження систем очистки. Визначено, що попри зростання прямих викидів CO₂ на 66% (до 92,03 кг/ГДж) за рахунок нижчої калорійності палива, біогенне походження вуглецю забезпечує нульовий вуглецевий баланс згідно з принципами LCA. Доведено, що підвищена концентрація CO₂ у факелі інтенсифікує радіаційний теплообмін, частково компенсуючи зниження температури горіння. Результати моделювання також вказують на збільшення далекобійності факела при роботі на біогазі, що створює додаткове термічне навантаження на задній екран і повинно враховуватися при оцінці малоциклової втоми металу барабанів. Практичне значення роботи полягає в обґрунтуванні технічної можливості та екологічної доцільності переведення котлів типу ДКВР на альтернативні види палива в межах стратегії енергонезалежності.

Ключові слова: котли ДКВР, біогаз, CFD-моделювання, оксиди азоту, декарбонізація, температурне поле, ANSYS, енергоефективність.



Постановка проблеми. Сучасний стан вітчизняного енергетичного сектору характеризується критичним рівнем фізичного та морального зносу обладнання, більша частина якого експлуатується понад 40–60 років. Для котлів типу ДКВР та ГМ-50 типовими є теплові та гідравлічні перекося, що призводять до нерівномірності термічного навантаження та виникнення додаткових напружень у металі. Понад 80% аварійних відмов котлів ДКВР-20-13 пов'язані з локальним перегрівом екранних труб, що особливо загострюється при роботі на низьких тисках, де ККД може знижуватися до 70–75%. Це зумовлює необхідність переведення таких агрегатів у водоگрійний режим та впровадження систем моніторингу на основі комп'ютерного моделювання [1].

Розвиток біогазових технологій та диверсифікація паливної бази. В умовах прагнення до енергетичної незалежності та виконання екологічних директив ЄС (2010/75/ЄС, 2015/2193[2]), в Україні спостерігається динамічне зростання біогазових потужностей. Біогаз, що складається переважно з метану (CH_4) та діоксиду вуглецю (CO_2), розглядається як вуглецево-нейтральна альтернатива природному газу. Прогнозується, що за умови державної підтримки частка відновлюваних джерел енергії у загальному споживанні може зрости до 91% до 2050 року. Особливий науковий інтерес викликає використання біогазу в промислових котлах, проте відмінність теплофізичних властивостей його продуктів згоряння від еталонних (до 6%) потребує коригування класичних методик теплового розрахунку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні вимоги до декарбонізації енергетики зумовлюють перехід на вуглецево-нейтральні види палива, зокрема біогаз. Дослідження спалювання суміші метану та CO_2 (76% CH_4 та 24% CO_2) на паровому котлі ДКВР-6.5-13 підтвердили можливість зниження рівня NO_x до 63...76 мг/Нм³, що відповідає стандартам ЄС для установок потужністю понад 1 МВт [3]. Питання екологізації застарілих котлів типу ДКВР 10-13 також ефективно вирішується методом впорскування пари в зону горіння. Зокрема, використання модернізованих розпилювальних торцевих кришок інжекторів дозволяє досягти 30% зниження емісії оксидів азоту при збереженні теплової ефективності агрегату[4].

Заміна природного газу біогазом потребує врахування змін у теплообміні через відмінність властивостей продуктів згоряння [5]. Аналіз показав, що теплопровідність та в'язкість суміші газів

біогенного походження відрізняються від еталонних показників на 6%, що при використанні стандартних методик розрахунку призводить до завищення значень температури відхідних газів та витрати палива. Аналіз доступно літератури свідчить, що в Світі окрему увагу приділяють технологіям кисневого горіння (oxy-fuel). Використання моделей турбулентності k- ω SST та FGM-моделей для аналізу спалювання біогазу в окислювачах O_2/CO_2 та $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ виявило [6], що перехід до киснево-парового режиму підвищує однорідність теплового потоку на стінці котла на 129,9%. Також встановлено, що підвищення вмісту O_2 понад 50% у режимі $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ не є економічно доцільним, попри зростання пікових температур до 2283 К.

Дослідження технології спільного спалювання в тангенціальних печах потужністю 300 МВт продемонстрували [7], що впорскування біогазу монотонно знижує концентрацію NO на виході. Найкращі показники екологічності при фіксованому коефіцієнті заміщення досягаються при використанні біогазу з тирси, при цьому зміна кута нахилу пальників до -15° сприяє росту концентрації NO на виході. Для котлів із барботажем киплячим шаром встановлено, що оптимальною точкою інтеграції біогазу є перший ряд вхідних отворів вторинного повітря, що забезпечує кращу стабільність горіння порівняно з подачею через пальник завантаження.

Ексергетичні оцінки процесу горіння окси-біогазу в адіабатичних печах [8] свідчать про зниження суми питомої термомеханічної та хімічної ексергії продуктів згоряння зі збільшенням частки CO_2 у паливі. Частка втрат ексергії внаслідок неповного згоряння зростає з 5,8% до 13,8% при збільшенні вмісту CO_2 з 10% до 40%. Проте застосування рециркуляції відпрацьованих газів (EGR) дозволяє реалізувати режим низькотемпературного горіння (MILD) для біогазу складу 60/40, що забезпечує рівномірний розподіл температур та зниження термічного навантаження на елементи топки [9].

Питання залишкового ресурсу барабанів котлів типу ДКВР та ГМ-50 залишається гострим через наявність концентраторів напружень. Встановлено, що найбільші напруження виникають у місцях зварних швів еліптичних кришок та поблизу отворів опускних труб [10]. Чисельне моделювання показало, що нерівномірність теплових полів, викликана конструктивними особливостями пальників, безпосередньо впливає на малоциклову втому металу, обмежуючи прогнозний

термін експлуатації барабанів до 15 років при поточних режимах навантаження [11].

Дослідження вказують на пріоритетність контролю пікових температур (1650–1900 К) для пригнічення генерації термічних оксидів азоту. Серед ефективних методів виділяють:

– Рециркуляцію димових газів (РДГ): здатна знизити емісію NO_x на 67...5%.

– Ступінчасте горіння: впровадження вітчизняних струменево-нішевих пальників 3-го покоління дозволяє знизити викиди за рахунок кращої аеродинаміки факела.

– Впорскування пари: метод, впроваджений для котлів ДКВР, забезпечує зниження NO_x на 30% при збереженні ефективності агрегату.

– Зміна геометрії газороздачі: встановлено, що використання прямокутних щілин замість круглих отворів у пальниках знижує NO_x на 12%, проте збільшує ризик перегріву заднього екрана через надмірну довжину факела.

Аналіз доступної літератури вказує на наявність двох ключових груп чисельних методів: CFD (ANSYS Fluent/CFX) для теплогідродинаміки та FEM (ANSYS Mechanical) для термомеханічного аналізу. CFD-моделювання: типи підходів з використанням моделей Species Transport та k-ε дозволяють детально візуалізувати зони активного горіння та розподіл теплових потоків (30...380 кВт/м² для ГМ-50). CFD -моделювання: необхідне для прогнозування залишкового ресурсу барабанів-сепараторів, які є найбільш навантаженими вузлами. Наразі у відкритому доступі відсутня універсальна методика, що поєднає CFD та FEM з урахуванням історії навантажень для об'єкта радянського зразка, що і визначає наукову нішу даного дослідження.

Особливістю котлів ДКВР є контакт корпусу барабана з розжареними газами, що спричиняє вторинну генерацію пари та порушення сольового балансу. Чисельні дослідження показують, що це створює складну хвилясту поверхню «дзеркала випаровування», що сприяє винесенню забруднень у пароперегрівач та ерозії турбін. Розрахунки вказують на виникнення максимальних напружень ($D_s = 128$ МПа) у місцях зварних швів еліптичних кришок та біля отворів опускних труб.

Проведений аналіз наукової літератури підтверджує, що використання біогазу як альтернативного палива є одним із ключових векторів декарбонізації енергетики. Попри значну кількість фундаментальних досліджень у галузі спалювання біомаси та біогазу, залишається низка

невирішених питань, що потребують подальшого вивчення:

Постановка завдання. Метою статті є підвищення надійності та екологічної безпеки експлуатації котельних агрегатів промислової (типу ДКВР) та муніципальної (малої потужності) енергетики шляхом розробки комплексних чисельних моделей теплотехнічних та термомеханічних процесів при диверсифікації паливної бази.

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

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. Для дослідження процесів тепломасообміну та горіння біогазу в паливні котла застосовано систему тривимірних рівнянь збереження маси, імпульсу та енергії, осереднених за Рейнольдсом (RANS). Враховуючи специфіку палива (суміш CH_4 та CO_2), математичний опис процесу доповнено рівняннями переносу хімічних компонентів та моделями турбулентно-хімічної взаємодії [12].

Течія багатокомпонентного середовища описується рівнянням нерозривності та рівнянням Нав'є–Стокса:

$$\nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho u v) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho g \quad (2)$$

де ρ – густина суміші, яка розраховується за законом ідеального газу для нестисливого середовища; u – вектор швидкості; $\bar{\tau}$ – тензор напружень.

Перенос енергії в зоні горіння враховує конвекцію, теплопровідність, дифузію компонентів та виділення теплоти внаслідок хімічних реакцій [13]:

$$\nabla \cdot (u(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left(\lambda_{eff} \nabla T - \sum h_j J_j + (\bar{\tau}_{eff} \cdot u) \right) + S_h \quad (3)$$

У контексті дослідження спалювання біогазу в котлі ДКВР, воно описує, як теплота розподіляється в паливні та як локальні хімічні процеси змінюють температурне поле. Нижче наведено детальний опис кожного члена рівняння:

– $\nabla \cdot (u(\rho E + p))$ – Конвективний перенос: Визначає потік енергії, що переноситься макроскопічним рухом газу зі швидкістю u . Врахування тиску p разом із внутрішньою енергією $(E+p)$ фактично описує перенос ентальпії. Це ключовий механізм поширення тепла від смолоскипів пальників по всьому об'єму топки.

– Дифузія та в'язка дисипація (Права частина в дужках). Ці члени описують перенос енергії на молекулярному та турбулентному рівнях:

– $\lambda_{eff} \nabla T$ – Теплопровідність: Описує перенос тепла завдяки градієнту температури. Коефіцієнт λ_{eff} є ефективною теплопровідністю, що враховує як молекулярну теплопровідність газу, так і турбулентну теплопровідність (λ_t), яка в умовах топки ГМ-50 є домінуючою.

– $\sum h_j J_j$ – Дифузійний перенос енергії: Описує перенос тепла, зумовлений дифузією самих хімічних речовин (компонентів j). Кожен компонент несе свою питому ентальпію h_j . У зоні горіння біогазу це дуже важливо, оскільки активна дифузія палива (CH_4 , H_2) у зону реакції супроводжується значним переносом енергії.

– $\bar{\tau}_{eff} \cdot u$ – В'язка дисипація: Описує перетворення кінетичної енергії руху газу в теплову через в'язку тертя. У паливних котлів цей член зазвичай має малий вплив, але враховується для повноти фізичної моделі [14].

– Джерело тепловиділення (S_h) – Хімічне джерело: Найважливіший член для вашого моделювання [15]. Він розраховується як:

$$S_h = - \sum_j \frac{h_j^0}{M_j} R_j \quad (4)$$

де h_j^0 – ентальпія утворення компонента, а R_j – швидкість його утворення або витрати в хімічній реакції. Саме тут враховується нижча теплота згорання біогазу. Оскільки біогаз містить 31% CO_2 , густина тепловиділення S_h у вашій моделі буде нижчою, ніж для чистого метану.

При описі цього рівняння варто підкреслити, що λ_{eff} та J_j розраховуються з урахуванням турбулентних характеристик, отриманих з Realizable k- ϵ моделі. Це дозволяє вашій моделі коректно відтворювати структуру полум'я та зони максимальних теплових напружень на екранах котла.

Для деталізації джерела тепловиділення S_h у вашій математичній моделі необхідно розкласти його на складові, що відповідають кожному горючому компоненту вашого специфічного біогазу. Це підкреслить глибину вашого дослідження та врахування багатокомпонентності палива.

Деталізація об'ємного джерела тепловиділення S_h . У загальному вигляді об'ємне джерело тепловиділення в рівнянні енергії визначається як сума теплових ефектів усіх хімічних реакцій, що протікають у розрахунковій коміріці:

$$S_h = - \sum_j \left(\frac{h_j^0}{M_j} + \int_{T_{ref}}^T (C_p)_j dT \right) R_j \quad (5)$$

де: h_j^0 – стандартна ентальпія утворення j -го компонента при $T_{ref} = 298,15 \text{ K}$; M_j – молярна маса компонента; R_j – сумарна швидкість утворення/витрати j -го компонента внаслідок хімічних реакцій, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$.

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 , тому джерело тепловиділення S_h декомонується на три основні складові:

– Тепловиділення від окиснення метану (CH_4). Це основний внесок у S_h (понад 99% енергії). Оскільки метан у вашому біогазі складає 67,70% об'єму, швидкість тепловиділення безпосередньо залежить від швидкості реакції R_{CH_4} , яка у свою чергу лімітується моделлю Eddy-Dissipation Concept (EDC).

– Тепловиділення від окиснення водню (H_2). Незважаючи на низьку концентрацію (0,13%), водень має надзвичайно високу швидкість горіння та питому теплоту згорання ($Q_{\text{H}_2} \approx 120 \text{ МДж/кг}$). Врахування цього компонента дозволяє точніше змоделювати зону займання (ignition zone) біля виходу з пальника, оскільки водень виступає «запалом» для метану.

– Тепловиділення від окиснення сірководню (H_2S). Внесок H_2S (0,04%) у загальний тепловий баланс мінімальний, проте його врахування в члені S_h є принциповим для коректного розрахунку локальних температур у зонах, де починається утворення SO_2 . Вплив баласту (CO_2 та N_2) на S_h . Хоча вуглекислий газ (31%) та азот (0,57%) не дають позитивного внеску в S_h , вони відіграють роль «теплого стоку». Велика кількість CO_2 у зоні горіння поглинає частину енергії на свій нагрів: Знижує локальну температуру (що зменшує S_h через температурну залежність швидкостей реакцій). Змінює теплоємність суміші $(C_p)_{mix}$, що входить у рівняння енергії.

Завершує опис математичної моделі модель механізму розрахунку швидкості хімічних реакцій

цій R_f , оскільки саме цей параметр пов'язує рівняння переносу енергії з газодинамікою потоку. Використана для розрахунку швидкостей реакцій модель Eddy-Dissipation Concept (EDC).

Граничні умови та параметри моделювання [16, 17]. З метою порівняння енергетичної та екологічної ефективності котла ГМ-50 при переході на альтернативне паливо, встановлено 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 $Q_u^p = 35,8$ 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 $\epsilon = 0,8 \dots 0,85$.

4. Вихід димових газів (Pressure Outlet). На виході з паливні (у площині фєстону) 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).

Обговорення отриманих результатів. На рис. 1 наведено результати чисельного моделювання розподілу температур у поздовжньому перерізі паливні котла ДКВР-10-13. Порівняльний аналіз полів температур дозволяє оцінити вплив зміни компонентного складу палива на процеси, що

мають місце в паливні котла, а саме при спалюванні природного газу (рис. 1, а) спостерігається формування стабільного факела з вираженою зоною максимальних температур у центральній частині топки. Пікові значення температур у ядрі факела досягають рівня 1650...1800 °С, що сприяє інтенсивній генерації термічних оксидів азоту, проте забезпечує високу щільність теплових потоків на екранні поверхні. У випадку переходу на біогаз (рис. 1, б), який характеризується наявністю значної частки баластних газів (CO_2), структура температурного поля зазнає суттєвих трансформацій. Спостерігається «розмиття» ядра факела та зниження пікових температур на 100...150 °С порівняно з природним газом. Це підтверджує висновки [3] щодо екологічних переваг біогазу, оскільки зниження температури в зоні активного горіння безпосередньо призводить до пригнічення реакцій утворення NO_x .

Аналіз рис. 1 також свідчить про те, що на обох візуалізаціях помітно вплив аеродинаміки пальників на заповнення об'єму паливні. У випадку біогазу (б) спостерігається дещо більша далькобійність факела, що зумовлено збільшенням масової витрати палива для підтримки номінальної потужності котла через нижчу калорійність біогенного газу. Це створює додаткове термічне навантаження на задній екран та потребує врахування при оцінці термомеханічної надійності трубної системи. Отримані дані візуалізації корелюють із результатами [5] щодо необхідності корекції розрахунків теплообміну, оскільки зміна конфігурації температурного поля безпосередньо впливає на коефіцієнт теплової ефективності екранів та температуру газів на виході з паливні.

На рис. 2 представлено результати чисельного моделювання локальної концентрації оксидів азоту (NO_x) у перерізі паливні котла ДКВР-10-13. Візуалізація дозволяє простежити механізм формування токсичних викидів залежно від типу палива. При спалюванні природного газу (рис. 2, а) спостерігається інтенсивне утворення NO_x безпосередньо в зоні активного горіння (ядра факела), де температури є максимальними. Високі локальні концентрації оксидів азоту чітко корелюють із раніше проаналізованим температурним полем (рис. 1, а), що підтверджує домінування механізму утворення «термічних» NO_x . Максимальні значення концентрацій зосереджені по осі пальника, що створює високе екологічне навантаження на виході з паливні. У випадку використання біогазу (рис. 2, б) картина розподілу суттєво змінюється в бік зменшення емісії. Наявність у складі біогазу діоксиду вуглецю

(CO₂), який виступає як інертний розріджувач, призводить до зниження середньої температури горіння та зменшення концентрації реагуючих компонентів. Це зумовлює значне скорочення зон інтенсивного утворення оксидів азоту. Отримані результати візуалізації узгоджуються з експериментальними даними [3], демонструючи можливість досягнення європейських екологічних стандартів без використання дорогих систем очищення димових газів.

Рис. 2, б також свідчить, що зона генерації NO_x є більш розтягнутою за довжиною топки порів-

няно з природним газом. Це пояснюється збільшенням об'ємної витрати біогазу та відповідною зміною кінетики хімічних реакцій. Попри більшу довжину зони реагування, абсолютні значення концентрації NO_x залишаються стабільно нижчими, ніж при спалюванні природного газу. Таким чином, результати моделювання підтверджують, що заміна природного газу на біогаз у котлах ДКВР-10-13 є ефективним методом деноксифікації, що дозволяє знизити екологічний вплив котла на прилеглі території.

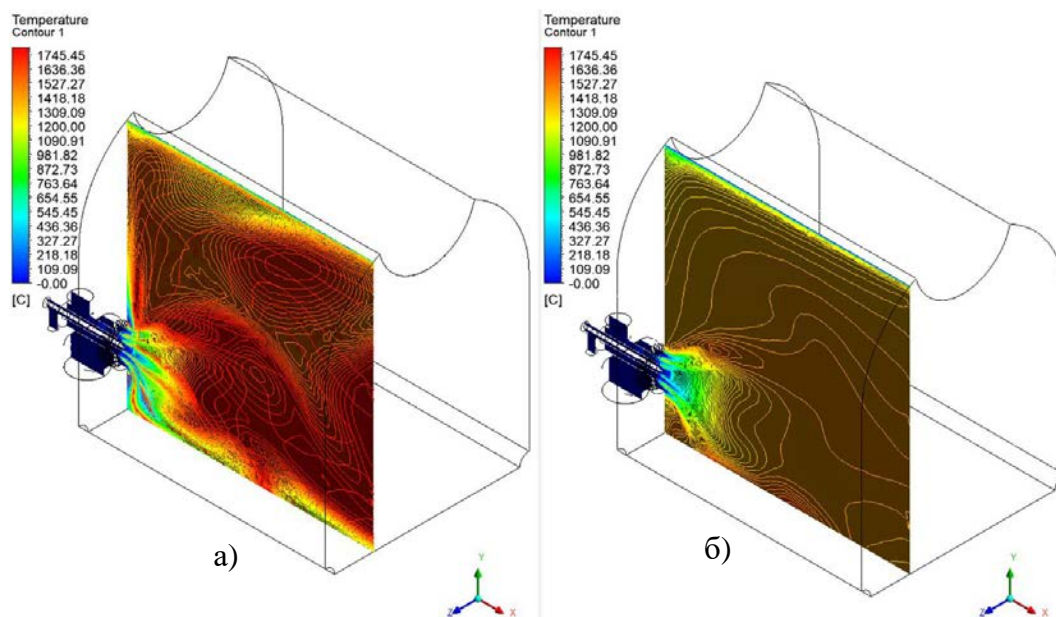


Рис. 1. Розподіл температур в перерізі паливні котла ДКВР-10-13 у випадку спалювання природного газу (а) і біогазу (б)

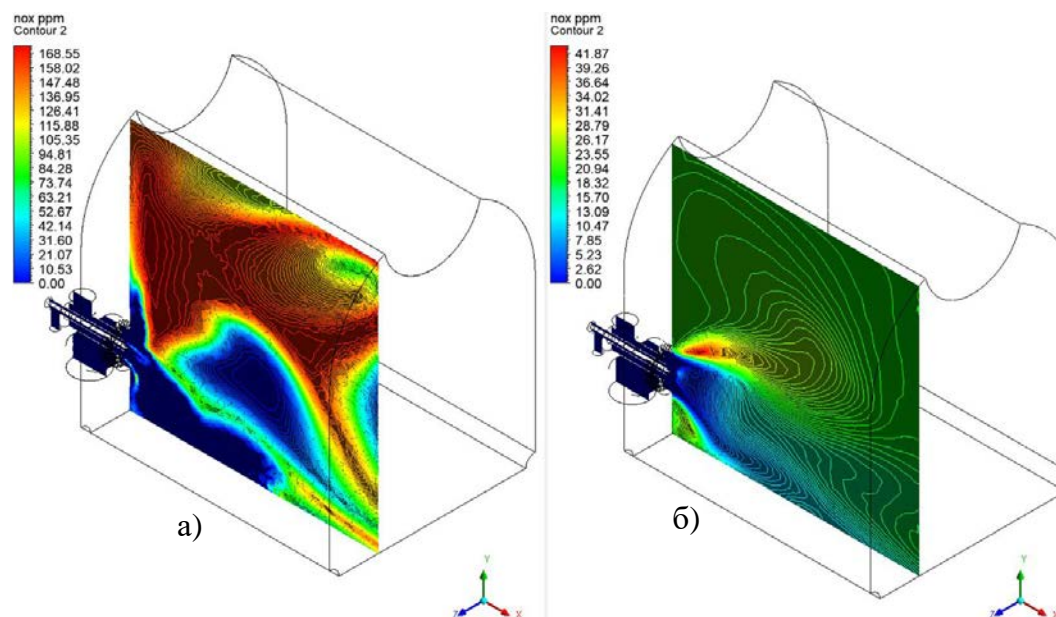


Рис. 2. Розподіл оксидів азоту в перерізі паливні котла ДКВР-10-13 у випадку спалювання природного газу (а) і біогазу (б)

Щоб розрахувати екологічну ефективність, порівнюємо масові викиди вуглекислого газу (CO_2) при спалюванні вашого біогазу (60% CH_4 , 40% CO_2) та чистого метану (як аналога природного газу) у розрахунку на 1 ГДж отриманої енергії.

Таблиця 1

Масові частки викидів

Паливо	Об'єм для 1 ГДж ($1000/Q_H^p$)	Викид CO_2 на 1 ГДж
Метан	27,93 м ³	$27,93 \times 1,977 = 55,22$ кг
Біогаз	46,55 м ³	$46,55 \times 1,977 = 92,03$ кг

Прямі викиди: На рівні труби (stack emissions) біогаз демонструє на ~66% вищі викиди CO_2 на одиницю енергії порівняно з природним газом. Це пояснюється тим, що для отримання тієї ж кількості тепла потрібно спалити більше об'єму біогазу, який сам по собі вже містить вуглекислоту.

Аналіз доступно літератури свідчить, що біогаз вважається вуглецево-нейтральним паливом оскільки CO_2 , що виділяється при його спалюванні, раніше був поглинутий рослинами з атмосфери під час росту біомаси.

Оскільки об'єм димових газів на 1 ГДж у біогазу більший, це призводить до збільшення втрат теплоти з відхідними газами (q_2), що трохи знижує ККД котла порівняно з роботою на природному газі.

CFD-моделювання дозволяє визначити концентрацію CO_2 у факелі біогазу, при чому вона значно (приблизно в 2,5 рази) вища чим у випадку спалювання природного газу. Це посилює радіаційний теплообмін (через випромінювання трьохатомних газів), що частково компенсує нижчу температуру горіння біогазу.

Висновки. Аналіз отриманих даних свідчить про специфічний характер формування екологічних показників при експлуатації котла ДКВР-10-13 на біогазовому паливі. Проведені розрахунки показують, що питомі викиди діоксиду вуглецю на одиницю виробленої теплової енергії для біогазу становлять приблизно 92,03 кг/ГДж, що на 66% перевищує аналогічний показник для природного газу (55,22 кг/ГДж). Таке зростання прямих викидів CO_2 обумовлене двома факторами:

1. Наявністю баластного CO_2 у складі палива (31...40%), який не бере участі в енерговиділенні, але збільшує загальну масу вуглецю в продуктах згоряння.

2. Нижчою теплоотою згоряння $Q_H^p \approx 21,5$ МДж/м³ проти 35,8 МДж/м³), що потребує спалювання більшого об'єму палива для забезпечення заданої теплової потужності агрегату. Однак, згідно з методологією оцінки життєвого циклу (LCA), біогаз класифікується як паливо з нульовим або близьким до нульового балансом викидів вуглецю. Це пояснюється біогенним походженням вуглецю: об'єм CO_2 , що виділяється в камері згоряння котла, еквівалентний об'єму, який був асимільований біомасою з атмосфери під час фотосинтезу.

З технічної точки зору, підвищена концентрація CO_2 у факелі біогазу має позитивний вплив на зниження емісії оксидів азоту (NO_x). Вуглекислий газ діє як інертний розріджувач, що знижує адіабатну температуру полум'я на 100...150 °С та інтенсифікує радіаційний теплообмін у топці. Це дозволяє досягти дотримання нормативів Директиви 2010/75/EU [2] без впровадження додаткових дорогих методів очистки димових газів, що робить переведення котлів ДКВР на біогаз екологічно виправданим кроком у межах стратегії декарбонізації енергетики України.

Список літератури:

- Сапегін О., Гелетука Г. та ін. Аналіз розвитку відновлюваних джерел енергії в Україні до 2050 року : звіт. 2021.
- «Енергетичний Перехід» - найбільший виклик часу для України: веб сайт. URL: <https://ua.boell.org/uk/2017/11/15/energetichniy-perehid-naubilshiy-viklik-chasudlya-ukrayini>
- 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.
- 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.
- Трубачев 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.
- 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. DOI: 10.1021/acsomega.4c00885.
- Hosseini S. E., Bagheri G. Numerical modeling of biogas diffusion flame in a swirl-stabilized boiler under oxy-fuel conditions. Energy. 2022. DOI: 10.1016/j.energy.2022.125206.

8. Karatas S., Derbentli T. Exergetic evaluations of oxy-biogas combustion in an adiabatic furnace. *International Journal of Thermodynamics*. 2023. DOI: 10.5541/ijot.1587174.
9. 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.
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.
12. Kuo K. K. *Principles of Combustion*. 2nd ed. New York : John Wiley & Sons, 2005. 732 p.
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.

Rachynskyi A.Yu., Baranyuk O.V., Tykhokhod V.O., Pikenin O.O. IMPROVEMENT OF RELIABILITY AND ENVIRONMENTAL SAFETY INDICATORS OF THE DKVR-10-13 BOILER DURING DIVERSIFICATION OF THE FUEL BASE

The article considers the current problem of modernization of boiler equipment of industrial and municipal energy of Ukraine in conditions of critical physical wear and the need to implement EU environmental directives on decarbonization. The object of the study is the processes of heat and mass transfer in fuel boilers DKVR-10-13 during the transition from natural gas to biogas. Using the method of numerical CFD modeling in the ANSYS environment, a comparative analysis of the processes that occur in fuel boilers during the combustion of methane and multicomponent biogas (67,76% CH₄, 31% CO₂) was carried out. The scientific novelty of the work lies in establishing the relationship between the ballast component of the fuel, the structure of temperature fields and the intensity of nitrogen oxide generation. The mathematical model was implemented on the basis of RANS equations, supplemented by the Realizable $k-\epsilon$ turbulence model and the Eddy-Dissipation Concept (EDC) chemical interaction model, which made it possible to take into account the influence of H₂ and H₂S on the combustion kinetics. It was found that the use of biogas leads to a “blurring” of the flare core and a decrease in peak temperatures by 100...150 °C, which ensures stable detoxication of combustion products without the introduction of purification systems. It was determined that despite the increase in direct CO₂ emissions by 66% (up to 92,03 kg/GJ) due to the lower calorific value of the fuel, the biogenic origin of carbon provides a zero carbon balance according to the principles of LCA. It was proven that the increased CO₂ concentration in the flare intensifies radiation heat exchange, partially compensating for the decrease in the combustion temperature. The modeling results also indicate an increase in the flare range when operating on biogas, which creates an additional thermal load on the rear screen and should be taken into account when assessing the low-cycle fatigue of the drum metal. The practical significance of the work lies in substantiating the technical feasibility and environmental feasibility of converting DKVR type boilers to alternative fuels within the framework of the energy independence strategy.

Keywords: DKVR boilers, biogas, CFD modeling, nitrogen oxides, decarbonization, temperature field, ANSYS, energy efficiency.

Дата першого надходження статті до видання: 15.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 12.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026