

144 ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.18:662.998:004.94

DOI: 10.31498/2225-6733.50.2025.336329

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ВОДОТРУБНО-ДИМОГАРНИХ КОТЛІВ ПРИ РОБОТІ НА БІОГАЗІ

- Дульський А.І.** аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3331-6241>, e-mail: anton201799@gmail.com;
- Сірий О.А.** канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5811-9037>, e-mail: o.sirvi@kpi.ua

Досліджено робочий процес водотрубно-димогоарного котла ВК 32 при переході з природного газу на біогаз (70% CH₄, 30 % CO₂) із застосуванням CFD моделювання. Верифікована на експериментальних даних модель дозволила оцінити вплив зміни палива на процес горіння, структуру температурного поля та утворення оксидів азоту. Проаналізовано гідродинаміку паливно повітряних струменів і розраховано безрозмірний гідродинамічний параметр q . Підкреслено важливість модернізації існуючого теплотехнічного обладнання. Запропоновано адаптаційні заходи – коригування геометрії паливникового колектора – для забезпечення стабільності факела та ефективної роботи котла на паливі з нижчою теплотворною здатністю.

Ключові слова: біогаз, котел ВК-32, CFD-моделювання, викиди NO_x, адаптація паливника.

Постановка проблеми

На тлі глобальних викликів, пов'язаних зі зміною клімату, скороченням запасів традиційних енергоресурсів та геополітичними ризиками постачання імпортованого палива, особливої актуальності набуває використання альтернативних палив об'єктами промисловості та енергетики [1]. Одним із ключових аспектів у цьому напрямі є впровадження відновлюваних джерел енергії, зокрема біогазу, що утворюється в результаті анаеробного розкладу органічних речовин та має потенціал заміни природного газу в низькотемпературних системах теплозабезпечення.

Склад біогазу наступний: 50-70% метану (CH₄), решта – це вуглекислий газ (CO₂), а також у незначних кількостях водень (H₂), сірководень (H₂S), азот (N₂) та водяна пара (зазвичай до 3% за об'ємом разом) [2, 3]. Біогаз вважається кліматично нейтральним паливом, адже під час його спалювання викиди CO₂ компенсуються тим, що цей газ уже перебував у біологічному кругообігу, а також за рахунок утилізації метану, який у разі неконтрольованого викиду в атмосферу має значно вищий парниковий потенціал [3].

Слід зазначити, що застосування біогазу вимагає вирішення низки технічних проблем. Його теплота згорання (до 25 МДж/м³) значно нижча за аналогічний показник природного газу (≈35 МДж/м³), а склад істотно змінюється залежно від сировини та технології виробництва [2, 3]. Ці фактори впливають на повноту згорання, якість тепловіддачі, рівень емісії токсичних компонентів (зокрема оксидів азоту – NO_x), стабілізацію полум'я, а також можуть призводити до пошкоджень або зниження ефективності роботи котельного обладнання.

Варто зазначити, що в Україні усі види газів поділяються на категорії та групи відповідно до їхніх характеристик горіння [[4]]. Основним критерієм сумісності паливникових пристроїв із різними видами газу є індекс Воббе. За виконання рівності (1) газові прилади, здатні ефективно і безпечно функціонувати при використанні порівнюваних газів без змін у конструкції обладнання чи коригування режимів його роботи.

$$W_{o1} = W_{o2} = \text{const} \pm 5\%, \quad (1)$$

де W_{o1} , W_{o2} – числа Воббе для газу, який використовується, і того, що замінює.

$$W_o = \frac{Q_n^p}{\sqrt{\rho}}, \quad (2)$$

де Q_n^p – нижча теплота згорання газу, кДж/м³, ρ – відносна густина газу.

$$\bar{\rho} = \frac{\rho_g}{\rho_{\text{пов}}}, \quad (3)$$

де ρ_g , $\rho_{\text{пов}}$ – густина горючого газу і повітря на горіння за однакових умов, кг/м³ [5].

Для біогазу із вмістом метану в межах 50-70% його значення коливається в діапазоні 17,6-27,1 МДж/м³, що суттєво нижче за показники природного газу групи L (≈ 39,1-44,8 МДж/м³). Відповідно, без відповідних інженерних змін у конструкції або режимах роботи паливника стабільна експлуатація обладнання на біогазі є малоімовірною.

Через нестабільність параметрів біогазу та обмеженість виробництва його використання доцільно насамперед у малопотужних системах локального теплозабезпечення. Такі системи мають потенціал до адаптації під змінний склад палива та можуть ефективно функціонувати за умов локального або сезонного постачання біогазу. Враховуючи ці обставини, актуальним є дослідження можливості адаптації типових

зразків котельного обладнання, що широко застосовуються в Україні, до роботи на біогазі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Згідно з [6, 7], робота паливоспалювального устаткування залежить від технології горіння. Раціональна організація процесу підвищує енергоефективність і надійність систем паливовикористання та визначається ефективністю паливкової системи. Однією з універсальних технологій горіння є ефективні палинкові пристрої струмінево-нішевого типу.

Перспективним рішенням у цьому контексті є модернізація або оптимізація палинкових пристроїв та систем подачі повітря під конкретні властивості біогазу. Універсальним рішенням може бути впровадження струмінево-нішевої технології (СНТ), яка забезпечує ефективне змішування палива з окиснювачем, стабільне горіння та авторегулювання суміші за рахунок особливої течії газів. Вона також дозволяє охолоджувати паливник і попередньо підігрівати паливо, підвищуючи енергоефективність устаткування в цілому [8].

Об'єктом дослідження в роботі є процес горіння палива у водогрійному котлі ВК-32, який широко використовується в Україні. Основним інструментом обрано чисельне моделювання горіння біогазової суміші в робочому об'ємі реверсивної топки та жаротрубної ділянки котельного агрегату.

Котел ВК-32 – це сталевий двоходовий водотрубно-димогарний котел із реверсивною камерою згоряння та водоохолоджуваними елементами (включаючи передні дверцята). Він розрахований на спалювання газоподібного або рідкого палива та має високу ефективність (ККД до 92%) [9]. Завдяки простоті конструкції, надійності та доступності в обслуговуванні, цей котел залишається актуальним навіть за умов змін у паливному балансі. Особливої уваги заслуговує його потенціал для адаптації до біогазу за рахунок модернізації палинкових пристроїв та коригування режимів подачі повітря. Враховуючи зазначені особливості, котел ВК-32 розглядається в якості базового об'єкту дослідження в цій роботі.

Мета статті

Метою даної роботи є аналітична оцінка адаптивності наявної конструкції котла та паливкового пристрою до використання біогазу як палива, без проведення дороговартісних натурних випробувань. В якості основного інструменту досліджень застосовується CFD-модель процесу горіння, достовірність якої підтверджена експериментом. Застосування математичного моделювання дозволяє:

- дослідити вплив зміни складу палива на глибину його вигорання;
- оцінити зміну температурного поля в камері згоряння та прилеглих теплопередавальних елементах;

- прогнозувати рівень емісії оксидів азоту (NO_x) при відповідному режимі роботи;

- дослідити гідродинамічні характеристики потоку, зокрема параметр далекобійності струменя, що визначає глибину проникнення палива в зону реакції.

Таке дослідження може бути корисним для України, враховуючи її потужний аграрний сектор та потенціал для виробництва біогазу, зокрема з відходів тваринництва, агропереробки та органіки в побутових відходах [10].

Виклад основного матеріалу

У цьому дослідженні було виконано чисельне моделювання процесу спалювання біогазу у водогрійному котлі типу ВК-32 (рис. 1) із застосуванням методів обчислювальної гідродинаміки (CFD). З метою підвищення достовірності результатів і верифікації побудованої моделі, на першому етапі було створено цифровий прототип котла, який відтворює умови та геометрію вже реалізованого експерименту (таблиця 1 дослідження 1) зі спалювання природного газу з використанням встановленого паливника СНТ. На цьому етапі було проведено порівняння розрахункових даних із експериментальними результатами, що дозволило оцінити адекватність математичної моделі, граничних умов та фізичних підходів. Лише після підтвердження коректності моделі в умовах спалювання природного газу було здійснено перехід до моделювання процесу спалювання біогазу, із врахуванням змін у складі палива, термохімічних характеристиках та потенційних відмінностях у розподілах температури та продуктів згоряння.



Рис. 1 – Водогрійний котел ВК-32 (КСВа-2.5)

Для чисельного дослідження до розгляду прийнято повну геометричну модель котла (розрахункова область дещо спрощена на окремих стінках камери горіння), включно з каналом паливника. На рис. 2 зображена спрощена 3D модель котла з паливником в розрізі, та розрахункова область.

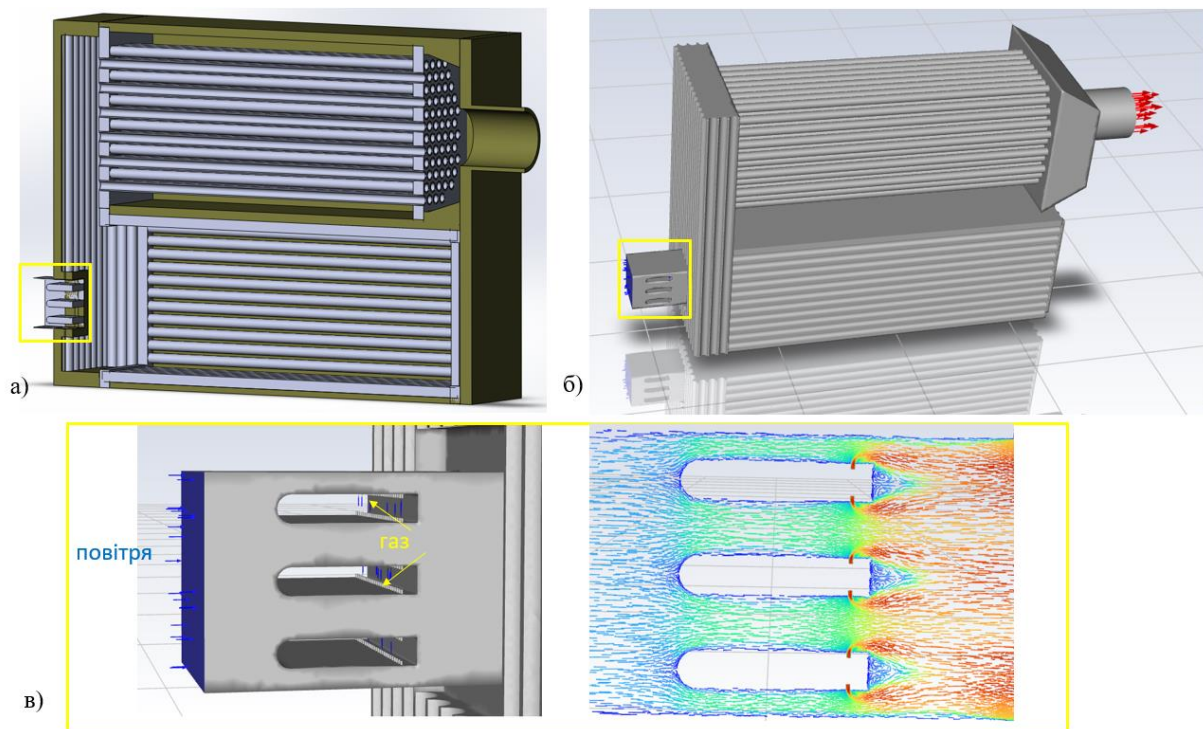


Рис. 2 – а – спрощена 3D модель ВК-32 (КСВа-2.5) з пальником в розрізі; б – розрахункова модель; в – розрахункова модель пальника та рух паливо-повітряної суміші в ньому

Чисельне моделювання процесу горіння виконувалося в середовищі ANSYS Fluent із використанням комплексу фізико-хімічних моделей, що дозволяють коректно описати характерні явища високотемпературного потоку продуктів згорання в газовому тракті котельного обладнання. Основою є одностадійна модель горіння метану, реалізована в комбінації з підходом Eddy Dissipation (Volumetric). Такий підхід дозволяє враховувати як кінетичні обмеження хімічних реакцій, так і вплив турбулентного змішування, що є визначальним у паливних камерах котлів із великомасштабним турбулентним потоком та нерівномірним розподілом температур. У Volumetric-реалізації додатково враховується тепловиділення у кожному об'ємі, що підвищує точність моделювання температурних полів.

Розрахунок променистого теплообміну виконувався методом сферичних гармонік в 1 наближенні (т. зв. P1 модель). P1 Radiation Model – компромісне рішення між точністю та обчислювальною ефективністю. На відміну від обчислювально дорогих моделей, таких як DO, вона забезпечує задовільну точність при помірних витратах ресурсів, що підтверджено в численних дослідженнях промислових пальникових пристроїв [[11]].

Для опису турбулентної течії застосовано модель k-ε Realizable з активованими опціями Curvature Correction та Enhanced Wall Treatment. Модифікація Realizable забезпечує покращене відтворення турбулентних потоків із великими деформаціями та вихорами, що робить її більш стійкою й точною для задач із

складною геометрією та вираженими тепловими градієнтами – типовими для котлів. Опція Curvature Correction підвищує точність у зонах різкої зміни напрямку потоку, таких як дверний газохід чи вхід до трубного пучка. Застосування Enhanced Wall Treatment забезпечує коректне моделювання граничного шару при комбінованій структурі обчислювальної сітки завдяки адаптації до локального значення y^+ – безрозмірного параметра, що визначає положення першого вузла сітки відносно стінки у задачах моделювання турбулентних течій. Значення y^+ дозволяє оцінити, наскільки точно сітка описує граничний шар, що є особливо важливим для достовірного прогнозування тепловіддачі від продуктів згорання до охолоджуваних поверхонь.

Математично модель описується системою рівнянь, яка включає:

- Рівняння нерозривності (Continuity Equation) – забезпечує збереження маси;
- Рівняння Нав'є-Стокса (Momentum Equations) – описує рух стискуваної, в'язкої рідини з урахуванням турбулентності;
- Рівняння енергії (Energy Equation) – необхідне для врахування теплових ефектів, зокрема горіння та теплообміну;
- Рівняння збереження компонентів суміші (Species Transport) – моделює перенос та хімічні реакції між газовими компонентами [[12]].

Найважливішим етапом CFD-моделювання є побудова якісної обчислювальної сітки. Вона визначає

точність, стабільність і швидкість збіжності розрахунку. Розмір і структура сітки суттєво впливають на обчислювальні витрати та загальний час моделювання [[11]]. Тому особливу увагу було приділено її побудові. В області камери згоряння та фронтальних дверцят котла було виконано локальне згущення сітки біля стінок (рис. 3а), для забезпечення адекватного опису градієнтів температури і швидкості, що критично важливо при моделюванні теплообміну між газами та теплообмінними поверхнями котла.

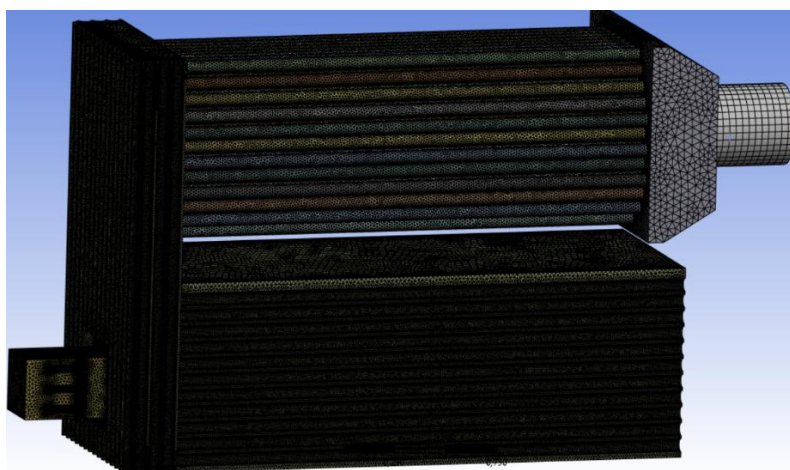
В зоні горизонтального трубного пучка був застосований метод Inflation, який створює кілька концентрованих шарів елементів біля стінок труб (рис. 3б). Цей підхід дозволяє коректно передавати теплові потоки за рахунок моделювання пограничного шару – області, де відбувається основна частина теплопередачі за рахунок конвекції. Правильна реалізація пограничного

шару критично впливає на точність розрахунку теплового навантаження на стінки і загальний розподіл температури.

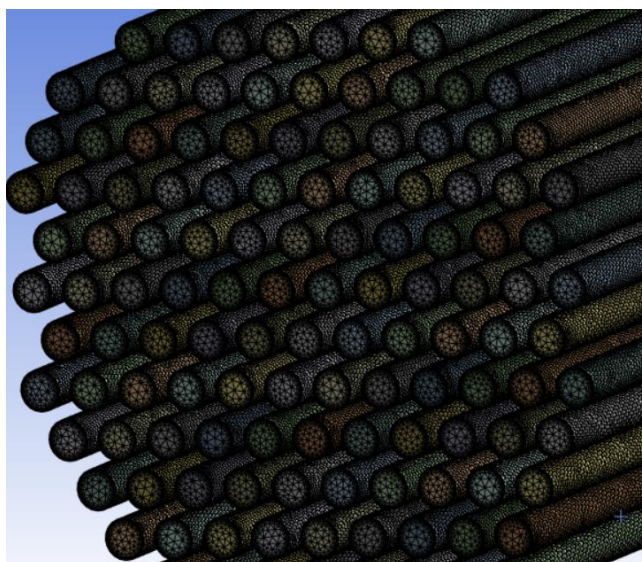
Модель була розбита на 128 об'ємів для можливості використання різних налаштувань сітки під конкретні зони. Якість сітки оцінювалась за такими критеріями:

- Aspect Ratio – співвідношення сторін елемента
- Orthogonality – ортогональність елементів
- Skewness – кривизна елемента або ступінь спотворення
- Smoothness – гладкість зміни розміру елементів або плавність переходів

Усі показники після перевірки перевищували мінімально допустимі значення, що забезпечило достатню стійкість і точність розрахунків.



а)



б)

Рис. 3 – Скінченно елементна сітка: а – вся розрахункова область, б – трубний пучок

Для моделювання теплообміну через металеві стінки котла була використана опція Shell Conduction, яка дозволяє задавати товщину, матеріал і температуру стінки (відповідно до технічних характеристик і режиму роботи котла) без необхідності її детального розбиття в 3D. Такий підхід значно зменшує складність геометрії та навантаження на обчислювальну сітку, зберігаючи при цьому точність теплопередачі.

На вхід розрахункової області застосовано умову типу Mass Flow Inlet із фіксованою масовою витратою та температурою вхідного потоку. На виході задано умову Pressure Outlet зі сталим значенням статичного тиску (відповідно до режиму роботи котла). Параметри реагуючих потоків, що задавались на вході, наведено в таблиці 1. Для спрощення дослідження замість природного газу було використано чистий метан. Його дещо вищу теплотворну здатність було компенсовано шляхом регулювання витрати палива.

При проведенні дослідження 1 значення для верифікації розрахунку бралися результати газового аналізу за котлом, а саме: викиди NO_x , температура димових газів, і порівнювались з середнім по площі значенням в розрізі вихідної димової труби розрахункової моделі. В таблиці 2 представлено результати. Результати моделювання виявили відхилення від експериментальних даних на рівні до 10%. Така невідповідність може бути зумовлена рядом факторів, зокрема використанням спрощених фізичних моделей – моделі випромінювання P1 та моделі турбулентного горіння Eddy Dissipation. Крім того, хоча якість обчислювальної

сітки загалом є задовільною для даного типу задач, її просторове згущення не є максимальним, що також могло певною мірою вплинути на точність відтворення локальних параметрів потоку та теплообміну.

Комбінований вплив цих факторів призводить до накопичення похибки. Проте, з урахуванням наявних обчислювальних потужностей, отримана точність є гранично досяжною для даної задачі.

У моделюванні горіння біогазу граничні умови були задані відповідно до Таблиці 1 (Дослідження 2). Для подачі палива обрано конфігурацію пальникового колектору, яка продемонструвала найкращі результати у попередньому дослідженні [[13]].

Витрата біогазу обиралася з точки зору забезпечення теплової потужності агрегату, як у Дослідженні 1. Це дозволяє здійснити коректне порівняння впливу типу палива за однакової теплової потужності на температурний розподіл, інтенсивність теплообміну та рівень утворення оксидів азоту.

На рис. 3, 4 наведено порівняння температурних розподілів у вертикальних осевих перетинах двох досліджень, а в таблиці 3 – середні значення викидів NO_x та температури димових газів на виході з димової труби розрахункової моделі.

Для біогазу спостерігається зниження пікових температур і зменшення викидів оксидів азоту, що узгоджується з попередніми роботами [13-15], які підтверджують вплив додавання CO_2 на зниження температури горіння та зниження викидів NO_x .

Таблиця 1

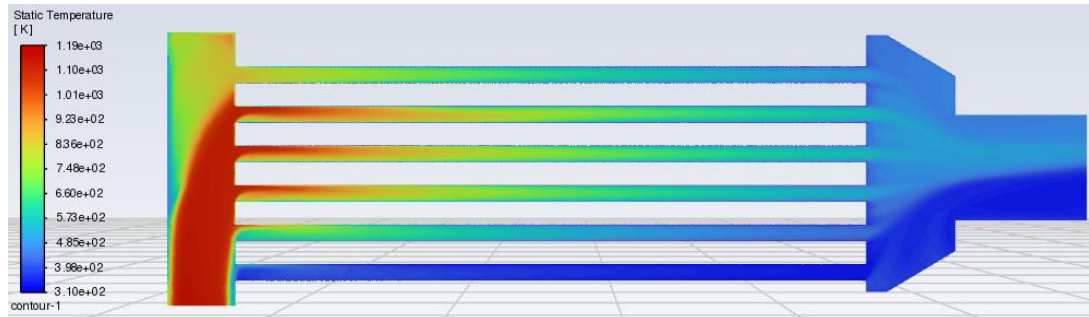
Граничні умови що задавались на вході, навантаження котла 107%

Найменування величини	Позначення	Розмірність	Дослідження 1	Дослідження 2	
Паливна суміш			Природний газ	Біогаз	
Компоненти			CH_4	CH_4	CO_2
Об'ємний вміст компоненту		%	100	70	30
Теплотворна здібність палива	$Q_{\text{нр}}$	МДж/м ³	35	25	
Витрата палива	$G_{\text{нг}}$	нм ³ /год	310	442.7	
Коефіцієнт надлишку повітря	α	-	1,32	1,32	
Температура повітря	$T_{\text{п}}$	°C	15	15	
Температура газу	$T_{\text{г}}$	°C	15	15	

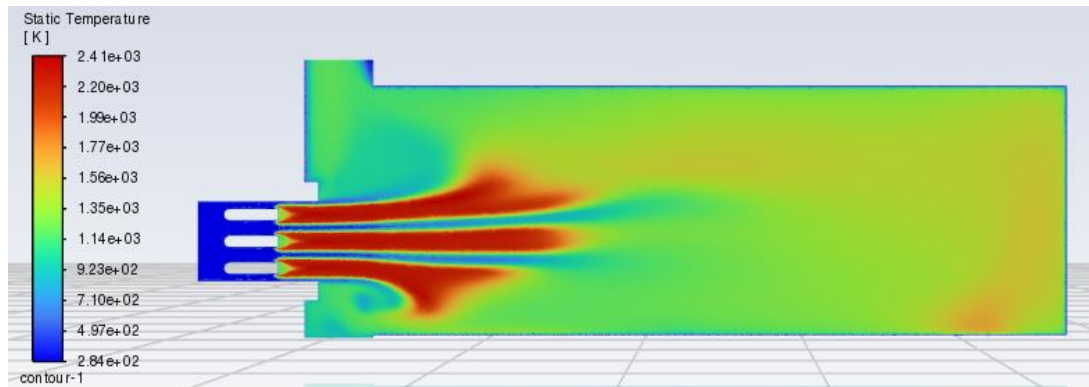
Таблиця 2

Верифікація результатів чисельного дослідження

Результати газового аналізу за котлом	Одиниця виміру	Експериментальне дослідження	CFD дослідження
Температура димових газів	°C	136	150
Вміст оксидів азоту	ppm	41	46

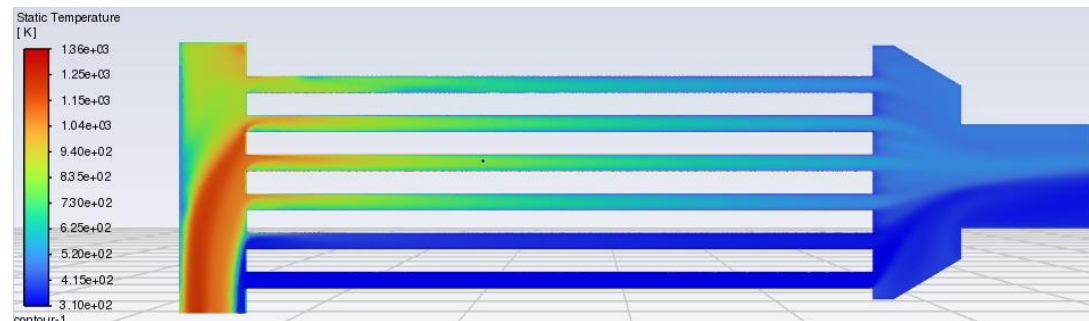


а)

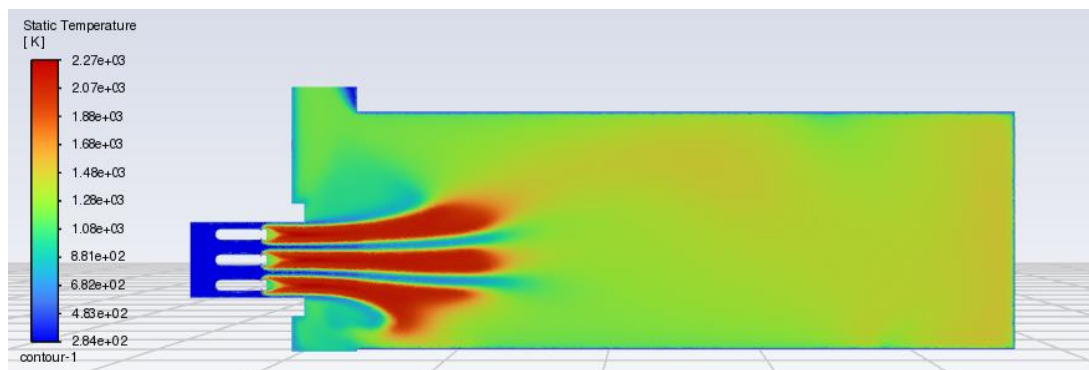


б)

Рис. 3 - Порівняння температурного поля продуктів згоряння у вертикальному осьових перетинах, для Дослідження 1:
а) жаротрубний теплообмінний пучок б) камера горіння з трубними екранами



а)



б)

Рис. 4 – Порівняння температурного поля продуктів згоряння у вертикальному осьових перетинах, для Дослідження 2:
а) жаротрубний теплообмінний пучок б) камера горіння з трубними екранами

Таблиця 3

Порівняння досліджень на виході з димової труби розрахункової моделі

Середні значення на виході з димової труби розрахункової моделі	Од. виміру	Дослідження 1	Дослідження 2
Температура димових газів	°C	150	160
Вміст оксидів азоту	ppm	46	20

Незважаючи на зниження температури в камері горіння, температура на виході з котла зросла на 10°C. Це може свідчити про погіршення теплообміну внаслідок додавання баластового газу CO₂, що пояснюється низькою теплопровідністю та вищою питомою теплоємністю цього газу, – він довше утримує тепло, що корелюється з [15]. Крім того, збільшення загального об'єму газової суміші підвищує швидкість руху продуктів згоряння через котел, а отже зменшує час їх перебування в зоні теплообміну.

Далекобійність паливних струменів відіграє ключову роль у роботі пальників СНТ, оскільки впливає на стабілізацію факела та ефективність процесу горіння. Це особливо важливо в умовах суттєвих змін витрати та в'язкості газів. Параметр, що характеризує далекобійність струменя, – це гідродинамічне відношення q , яке визначається як відношення динамічних напорів палива та окисника.

$$q = (\rho_r \cdot W_r^2) / (\rho_n \cdot W_n^2), \quad (4)$$

де ρ_r , ρ_n – густина пального газу і повітря відповідно, W_r і W_n – швидкість газу і повітря.

Так в пальнику дослідження 1, де $d=3$, $s/d = 4$, $q = 25.93$, а у випадку дослідження 2, де $d=4$, $s/d = 3$, $q = 28.53$. Такі близькі значення параметра q свідчать про вдалий підбір геометричних характеристик газового колектора для біогазу, що дозволяє забезпечити подібну далекобійність струменів та, відповідно, стабільність процесу горіння порівняно з умовами для природного газу.

Висновки

В результаті проведеної роботи можна зробити наступні висновки:

– Моделювання процесу горіння на природному газі показало задовільну відповідність експериментальним даним, з відхиленням не більше 10%, що підтверджує коректність застосованої чисельної моделі;

– Застосування біогазу з вмістом 30% CO₂ призводить до зниження пікових температур у камері горіння та емісії NO_x, проте спостерігається зростання температури димових газів на 10°C, що пояснюється погіршенням теплообміну через фізичні властивості CO₂;

– Проведений розрахунок гідродинамічного відношення q для обох типів палива засвідчив, що при оптимальному підборі геометрії газового колектора (збільшення діаметра газоподавального отвору) для біогазу забезпечується подібна далекобійність струменів, що необхідно для стабільного горіння;

– Отримані результати дозволяють зробити висновок про можливість використання біогазу в існуючих паливних системах за умов належного коригування геометричних параметрів паливорозподілу пальника для забезпечення стабільності факела та ефективності горіння.

В роботі запропонована методика математичного моделювання горіння біогазу в котлі ВК-32, яка може бути використана при моделюванні робочого процесу багатоходових жаротрубних водогрійних котлів.

Перелік використаних джерел

- [1] Дульський А.І., Сторожук М.С. Альтернативні палива в енергетиці, проблеми та перспективи. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. Т. 34(73), № 5. С. 300-309. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/46>.
- [2] Особливості синтезу системи виробництва і спалювання біогазу на спиртзаводі / Боднар Л.А., Денесяк Д.І., Іщенко К.О., Лукьянець А.С. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2009. Вип. 25, № 2. С. 145-151. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2018-2-145-151>.
- [3] Biogas production – A review on composition, fuel properties, feed stock and principles of anaerobic digestion / B. Bharathiraja et al. *Renewable and sustainable Energy reviews*. 2018. Vol. 90(April). Pp. 570-582. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.093>.
- [4] Колієнко А.Г., Крошка О.В. Горючий газ й ефективність його використання в Україні: основні проблемні питання. Ч. 2. URL: <https://bizagro.com.ua/goryuchyj-gaz-j-efektyvnist-jogo-vykorystannya-v-ukrayini-osnovni-problemni-pytannya-2/> (дата звернення: 15.04.2025).
- [5] Бондар Л.А., Куленко О.О. Особливості спалювання суміші газів в промислових теплогенеруючих установках. *Матеріали ЛІІ науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ*, м. Вінниця, 21-23 червня 2023 р. С. 1-3.
- [6] Абдулін М.З., Горбань К.С., Сірий О.А. Взаємозв'язок робочого процесу паливкового пристрою на основі струменево-нішової технології спалювання газу з екологічними аспектами роботи вогнетехнічних об'єктів. *Теплофізика та теплоенергетика*. 2019. Вип. 41(3). С. 63-69. DOI: <https://doi.org/10.31472/tpe.3.2019.9>.

- [7] Сірий О.А., Кобилянська О.О. Шляхи покращення сталості горіння в стабілізаторних елементах прямооточних пальникових систем. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, 2023, т. 34(73), № 5. С. 310-315. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/47>.
- [8] Абдулін М.З., Сірий О.А. Дослідження сталості процесу горіння у струменево-нішевій системі спалювання палива. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2018. Т. 29(68), № 1(2). С. 55-60.
- [9] Технічні характеристики Котла сталевого водогрійного КСВа-2,5 «БК-32». URL: <https://megavat.com.ua/products/kotly-vodogrijni/kotly-stalevi-vodogrijni-ksva-vk-32/ksva-2-5-vk-32/> (дата звернення: 10.03.2025).
- [10] Токарчук Д.М., Пришляк Н.В., Паламаренко Я.В. Перспективи використання відходів рослинництва на виробництво біогазу в Україні. *Агросвіт*. 2020, Вип. 22. С. 51-57. DOI: <https://doi.org/10.32702/2306-6792.2020.22.51>.
- [11] Impact of P-1 radiation model on simulated free jet flame characteristics of gaseous fuels: CFD with PDF approach / H.F. Elattar et al. *Thermal Science*. Vol. 27, no. 5B. Pp. 3921-3938. DOI: <https://doi.org/10.2298/TSCI230109038E>.
- [12] Noor M., Wandel A., Yusaf T. Detail guide for CFD on the simulation of biogas combustion in bluff-body mild burner. *Proceedings of the 2nd International Conference on Mechanical Engineering Research (ICMER 2013)*, Pahang, Malaysia, July 1-4, 2013. Pp. 1-25.
- [13] Дульський А.І., Сірий О.А. CFD-Моделювання процесу спалювання суміші метан-біогаз у струменево-нішевому стабілізаторі полум'я. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2024. Т. 35(74), № 5. С. 6-12. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.2/02>.
- [14] Mordaunt C.J., Pierce W.C. Design and preliminary results of an atmospheric-pressure model gas turbine combustor utilizing varying CO₂ doping concentration in CH₄ to emulate biogas combustion. *Fuel*. 2014. Vol. 124. Pp. 258-268. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.01.097>.
- [15] The role of dilution level and canonical configuration in the modeling of MILD combustion systems with internal recirculation / G. Ceriello et al. *Fuel*. 2020. Vol. 264. Article 116840. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116840>.

RESEARCH OF THE WORKING PROCESS OF WATER-TUBE/FIRE-TUBE BOILERS OPERATING ON BIOGAS

Dulskiy A.

postgraduate student, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute», Kyiv, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3331-6241>, e-mail: anton201799@gmail.com;

Siriyi O.

PhD (Engineering), associate professor, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute», Kyiv, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5811-9037>, e-mail: o.siriyi@kpi.ua

The transition to sustainable energy sources is of critical importance in the context of global climate change, geopolitical instability in fuel supply, and the depletion of fossil energy resources. Biogas, produced through the anaerobic decomposition of organic matter, is considered a promising renewable alternative to natural gas in low-temperature heating systems. However, its variable composition, reduced calorific value, and high carbon dioxide content create significant technical limitations for its use in conventional burner equipment. These factors necessitate a comprehensive evaluation of the capability of existing boiler systems to operate effectively under conditions of fuel substitution. The article is dedicated to the analysis of the main operational challenges arising during the combustion of biogas in thermal energy systems. Issues related to flame stability, thermal efficiency, and emission control are examined. The study evaluates the substitution of natural gas with biogas under conditions close to real operation. Particular attention is paid to the influence of the physico-chemical properties of the fuel on combustion behavior and heat transfer efficiency. Computational fluid dynamics (CFD) methods are applied to model the thermochemical processes occurring within the combustion chamber of a fire-tube boiler. The study includes an assessment of the temperature field, fuel-air mixture interaction, and the formation of pollutants, particularly nitrogen oxides. The role of burner geometry in maintaining stable combustion during the transition to biogas is determined. The hydrodynamic behavior of fuel jets is investigated to assess their impact on flame stability and propagation. The influence of CO₂ dilution in the fuel mixture on temperature gradients and heat transfer processes is analyzed, as it may potentially lead to reduced efficiency. The interaction of fuel and oxidizer flows is discussed to evaluate jet penetration and mixing quality under varying fuel compositions. As a result, the possibility of adapting conventional thermal equipment to operate on renewable gaseous fuels is substantiated. A numerical approach to modeling the combustion process of biogas in a VK-

32 boiler is proposed, which can be adapted for simulating heat exchange processes in similar types of fire-tube hot water boilers.

Keywords: biogas, VK-32 boiler, CFD modeling, NOx emissions, burner adaptation.

References

- [1] A.I. Dul'skyi, and M.S. Storozhuk, «Alternatyvni palyva v enerhetytsi, problemy ta perspektyvy» [«Alternative fuels in energy, problems and prospects»], *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky – Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, vol. 34(73), № 5, pp. 300-309, 2023. doi: 10.32782/2663-5941/2023.5/46. (Ukr.)
- [2] L. Bodnar, D. Denysiak, K. Ishchenko, and A. Lukanets, «Osoblyvosti syntezu systemy vyrobnytstva i spalivannia biohazu na spyrtzavodi» [«Characteristics of synthesis the production system and biophase sizing at alcohol factory»], *Suchasni tekhnologii, materialy i konstruktivni v budivnytstvi – Modern technologies, materials and design in construction*, vol. 25, no. 2, pp. 145–151, 2019. doi: 10.31649/2311-1429-2018-2-145-151. (Ukr.)
- [3] B. Bharathiraja, T. Sudharsana, J. Jayamuthunagai, R. Praveenkumar, S. Chozhavendhan, and J. Iyyappan, (2018). «Biogas production – A review on composition, fuel properties, feed stock and principles of anaerobic digestion», *Renewable and sustainable Energy reviews* vol. 90, pp. 570-582, 2018. doi: 10.1016/j.rser.2018.03.093.
- [4] A.H. Koliienko, and O.V. Kroshka, «Horiuchy haz y efektyvnist yoho vykorystannia v Ukraini: osnovni problemni pytannia. Ch. 2» [«Combustible gas and the efficiency of its use in Ukraine: main problematic issues. Part 2»]. 2025. [Online]. Available: <https://bizagro.com.ua/goryuchy-gaz-j-efektyvnist-jogo-vykorystannia-v-ukrayini-osnovni-problemni-pytannia-2/>. Accessed on: April 15, 2025. (Ukr.)
- [5] Bondar L.A., Kulenko O.O. «Osoblyvosti spalivannia sumishi haziv v promyslovykh teploenergiichnykh ustanovkakh» [«Features of combustion of gas mixtures in industrial heat generating plants»], in *Proc. LII Sci.-techn. Conf. of VNTU Departments, Vinnytsia, Ukraine, 2023*, pp. 1-3. (Ukr.)
- [6] M. Abdulin, K. Horban, and O. Siryy, «Vzaimozv'язok robochoho protsesu palnykovoho prystroiu na osnovi strumenevo-nishovoi tekhnologii spalivannia hazu z ekolohichnyimi aspektami roboty vohnetekhnichnykh ob'ektiv» [«Interrelation of working process of the burner device based on stream-niche technology of gas burning with environmental aspects of fireengineering object's work»], *Teplofizyka ta teploenerhetyka – Thermophysics and Thermal Power Engineering*, vol. 41(3), pp. 63-69, 2019. doi: 10.31472/ttpe.3.2019.9. (Ukr.)
- [7] O.A. Siryi, and O.O. Kobylianska, «Шляхи покращення сталості горіння в стабілізаторних елементах прямооточних пальникових систем» [«Ways of improving stability of combustion in stabilizer elements of direct flow burner systems»], *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky – Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, vol. 34(73), № 5, pp. 310-315, 2023. doi: 10.32782/2663-5941/2023.5/47. (Ukr.)
- [8] M. Abdulin, and O. Siryy, «Doslidzhennia stalosti protsesu horinnia u strumenevo-nishevii systemi spalivannia palyva» [«Stability analysis of combustion action in the jet-niche system of burning fuel»], *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky – Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, vol. 29(68), № 1(2), pp. 55-60, 2018. (Ukr.)
- [9] Tekhnichni kharakterystyky Kotla stalevoho vodohriinoho KSVa-2,5 «VK-32» (Technical characteristics of the steel water-heating boiler KSVa-2.5 «VK-32»). [Online]. Available: <https://megavat.com.ua/products/kotly-vodogrijni/kotly-stalevi-vodogrijni-ksva-vk-32/ksva-2-5-vk-32/>. Accessed on: March 10, 2025. (Ukr.)
- [10] D. Tokarchuk, N. Prishlyak, and Y. Palamarenko, «Perspektyvy vykorystannia vidkhodiv roslynnytstva na vyrobnytstvo biohazu v Ukraini» [«Prospects for use of crop waste for biogas production in Ukraine»], *Ahrosvit*, vol. 22, pp. 51-57, 2020. doi: 10.32702/2306-6792.2020.22.51. (Ukr.)
- [11] H.F. Elattar, E. Specht, B.A. Almohammadi, M.H. Mohamed, and H.A. Refaey, «Impact of P-1 radiation model on simulated free jet flame characteristics of gaseous fuels: CFD with PDF approach», *Thermal Science*, vol. 27, no. 5B, pp. 3921-3938, 2023. doi: 10.2298/TSCI230109038E.
- [12] M. Noor, A. Wandel, and T. Yusaf, «Detail guide for CFD on the simulation of biogas combustion in bluff-body mild burner», in *Proc. of the 2nd Int. Conf. on Mechanical Engineering Research (ICMER 2013)*, Pahang, Malaysia, 2013, pp. 1-25.
- [13] A.I. Dul'skyi, and O.A. Siryi, «CFD-Modeliuvannia protsesu spalivannia sumishi metan-biohaz u strumenevo-nishevomu stabilizatori polumia» [«CFD modeling of the combustion process of methane-biogas mixture in a jet-niche flame stabilizer»], *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky – Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, vol. 35(74), № 5, pp. 6-12, 2024. doi: 10.32782/2663-5941/2024.5.2/02.
- [14] C.J. Mordaunt, and W.C. Pierce, «Design and preliminary results of an atmospheric-pressure model gas turbine combustor utilizing varying CO₂ doping

concentration in CH₄ to emulate biogas combustion», *Fuel*, vol. 124, pp. 258-268, 2014. doi: 10.1016/j.fuel.2014.01.097.

recirculation», *Fuel*, vol. 264, article 116840, 2020. doi: 10.1016/j.fuel.2019.116840.

- [15] G. Ceriello, G. Sorrentino, A. Cavaliere, P. Sabia, M. de Joannon, and R. Ragucci, «The role of dilution level and canonical configuration in the modeling of MILD combustion systems with internal

Стаття надійшла 17.05.2025

Стаття прийнята 01.06.2025

Стаття опублікована 30.06.2025

Цитуйте цю статтю як: Дульський А.І., Сірий О.А. Дослідження робочого процесу водотрубно-димогарних котлів при роботі на біогазі. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки.* 2025. Вип. 50. С. 164-173. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336329>.