

ЕНЕРГЕТИКА

УДК 536.24:533.6.011

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.5/27>

Баранюк О.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Воробйов М.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Рябцун Р.С.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТА ЕКОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОБОТИ КОТЛА ДКВР-10-13 ПРИ ДОДАВАННІ ВОДНЮ ДО ПРИРОДНОГО ГАЗУ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Відомо, що традиційна енергетика є галуззю, що в першу чергу відповідає за генерацію парникових газів. За 150 років її існування значно підсилюється парниковий ефект, що призвело до кліматичної кризи. На сьогоднішній день проблема зменшення використання викопних вуглеводнів, зокрема природного газу визнана в більшості країн світу як проблема національної безпеки. Для її вирішення втілюють різноманітні заходи, які пов'язані з ефективним використанням альтернативних видів палив та підвищенням енергоефективності об'єктів теплової енергетики.

Для вирішення згаданої проблеми все більше використовуються водневі технології. Відомо, що водень вже достатньо широко використовують як автомобільне паливо [1]. Роботи авторів [2] свідчать, що використання водню у двигунах з іскровим запалюванням дає можливість покращити якість згоряння палива та покращити їх екологічні показники. Це в свою чергу спонукало до використання водню в енергетиці і комунально-побутовому секторі при заміщенні природного газу шляхом домішування водню в газові мережі [3, 4].

Мета роботи є прогнозування утворення окислів азоту (NO_x) при спалюванні природного газу з добавкою водню в штатних осьових пальниках які використовуються в водогрійних котлах типу ДКВР-10-13 за допомогою методів комп'ютерного моделювання. Для моделювання використовувалась академічна ліцензія програмного комплексу ANSYS Student яка з 2015 року є безкоштовною і призначена для вирішення ознайомлювальних і освітніх задач в академічному середовищі.

В ході моделювання визначено, що процентний вміст водню в паливній суміші з метаном [H_2] = 30 % (до об'єму паливо-повітряної суміші) дозволяє знизити генерацію NO_x в 3,7 рази порівняно з випадком спалювання метану. Подальше збільшення [H_2] до 40 та 50 % не призводить до зменшення утворення NO_x .

Попередньо проведена верифікація розрахункових даних викидів окислів азоту з даними режимної карти котла типу ДКВЕР-10-13 для випадку спалювання метану. Результат порівняння свідчить, що модель розроблена в середовищі ANSYS-Fluent дещо завищує значення NO_x на виході з котла. Це може бути пов'язано з недосконалістю комп'ютерної моделі порівняно з реальним об'єктом. Проте тенденція залежності значення викидів окислів азоту на виході з котла від процентного вмісту водню повністю відповідає аналогічній залежності для побутового двоконтурного котла «MICRA DUO CS 24» фірми «RÖDA» [5], що свідчить про доцільність використання водню в якості часткової заміни традиційного природного газу паливоспалюючим устаткуванням.

Ключові слова: воднева енергетика, емісія, метано-воднева суміш, моделювання, завихреність, окисли азоту.

Постановка проблеми. Вже багато років викопне паливо забезпечує електроенергією та теплом промисловість, транспорт і побутовий сектор. Проте використання викопних видів палива продукує в атмосферу 73% від усіх викидів парникових газів у світі. За 150 років це значно посилює парниковий ефект і призвело до кліматичної кризи. Для пом'якшення наслідків та адаптації до зміни клімату держави створюють власні стратегії «нульових» викидів, що спираються на використання новітніх енергоефективних технологій, застосуванню практик відновлення екосистем та розвитку відновлюваних джерел енергії. За таку амбітну ціль взялися країни від Південної Африки та Великобританії до Німеччини та Японії, а віднедавна – і Україна, яка заявила про свою довгострокову мету досягти нульових викидів до 2060-го року [6].

Використання водню в якості часткової заміни традиційного природного газу паливоспалюючим устаткуванням може бути першим кроком на шляху забезпечення діючих та майбутніх екологічних норм. Тому, представлена робота присвячена аналізу можливості застосування водню в технологіях спалювання у якості домішки до основного палива з метою часткового заміщення традиційного природного газу об'єктами побутового та промислового призначення [5, 7]. Дослідження проводилось за допомогою CFD-моделі водогрійного котла типу ДКВР-10-13, оснащеного штатними осьовими пальниками шляхом прогнозування утворення окислів азоту (NO_x) при спалюванні природного газу з добавкою водню.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогоднішній день існує гостра необхідність економії дефіцитних енергоресурсів і в першу чергу, це твердження стосується випадку спалювання природного газу. Тому до пальників висуваються підвищені вимоги стосовно розширення меж потужності за рахунок зниження пускових тисків палива, збільшення одиничної потужності при нормативних показниках по емісійним характеристикам, а також ефективності вигорання палива. Таким чином, розуміння механізмів утворення шкідливих речовин і можливість прогнозування їх емісії на кількісному рівні при зміні співвідношення палива і окислювача в суміші є одними з основних питань забезпечення норм охорони навколишнього середовища.

Одним із способів досягнення низьких рівнів шкідливих речовин є додавання до паливо-повітряної суміші газоподібного водню. В європейських країнах, передбачається використання

водню як компонента, що додається до органічного палива, насамперед – природного газу, з метою забезпечення декарбонізації атмосфери та зменшення впливу на глобальні кліматичні зміни шляхом скорочення викидів CO_2 з продуктами згоряння. З огляду на це H_2 розглядається саме як «зелений водень», який одержують з використанням «екологічно чистої» (green, renewable) енергії (сонячної, вітряної). Проте, виробництво «зеленого» водню шляхом електролізу є дуже витратним. Передбачається, що вартість 1 кВт·год у місці виробництва H_2 у 2030 р. становитиме 0,1 євро [5].

З іншого боку, останнім часом значний інтерес виявлено до створення нового палива – «hythane». Це метано-воднева суміш (МВС) із вмістом [H_2] від 20 до 44–48%. Використовуються два принципово різні типи технологій одержання цього палива:

- шляхом змішування природного газу з воднем, що виробляється електролізом води;
- з застосуванням технології адіабатичної конверсії метану (АКМ), що реалізується без сторонніх енергоносіїв; сировина при цьому – природний газ, енергоносієй – продукти згоряння природного газу.

Передбачається використання МВС в ГТУ, енергетиці, транспорті та в промислових технологіях.

Автори роботи [5] виконали експериментальні дослідження направлені на визначення енергетичної ефективності та викидів шкідливих речовин під час спалювання метано-водневої суміші в побутовому двоконтурному котлі «MICRA DUO CS 24» фірми «RÖDA». Визначено вплив складу палива на утворення шкідливих викидів, що наглядно представлено на рис. 1. Співвідношення [H_2]/[CH_4] в паливній суміші вказано на графіку.

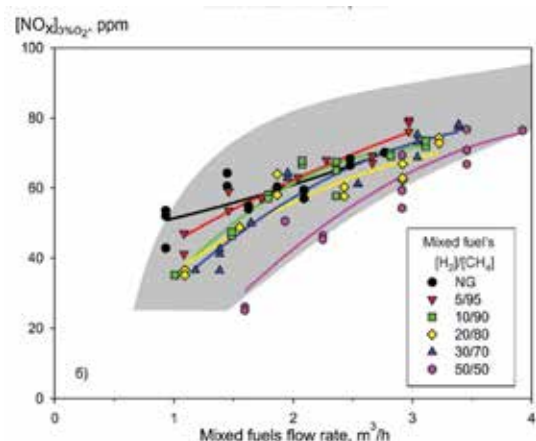


Рис. 1. Залежність викидів NO_x , ppm для котла від витрат палива, $\text{m}^3/\text{год}$ [5]

Автори роблять висновок, що викиди NO_x збільшуються із зростанням витрат палива. Водночас

зберігається тенденція суттєвого зменшення викидів в усьому діапазоні варіювання теплової потужності (паливоспоживання) із збільшенням вмісту H_2 , в тому числі – для випадку максимально випробуваного вмісту $[H_2]$ в паливі ($[H_2] = 50\%$). Для такого палива концентрація $[NO_x] 3\%O_2$ зростає від 20 (1л/хв) до $[NO_x] 3\%O_2 \approx 80$ ppm (при 6 л/хв).

Слід зазначити, що визначальним фактором щодо емісії шкідливих речовин є технологія спалювання. В роботі [7] розглянуто головні етапи побудови CFD-моделі процесу згоряння суміші палив метан-водень в струменево-нішевій системі (СНС) стабілізації та спалювання палива. Автори зазначають, що як для чистого метану, так і для суміші метан-водень, при збільшенні коефіцієнту надлишку повітря відбувається підвищення локальних температур горіння в об'ємі ніші, а отже й зменшення довжини факелу реагуючої суміші. Домішки водню збільшують швидкість витікання струменів палива та їх далекобійність в середньому на 18%, при забезпеченні робочого режиму пальника. Так, при спалюванні суміші дещо збільшується гідродинамічний показник, тому стабілізація та горіння факелу відбувається не тільки безпосередньо над нішею (як для випадку з чистим метаном), а й частково зміщується далі у потоці реагуючої суміші. З розрахунків встановлено, що додавання водню в об'ємі від $\frac{1}{4}$ до $\frac{1}{2}$ збільшує емісію NO_x на 27%.

Аналіз робіт, направлених на обґрунтування ефективності використання водневмісного газу у двигунах внутрішнього згоряння свідчить, що додавання 10% водню до дизельного палива дозволяє на 30% скоротити його витрату, що у свою чергу зменшує токсичні викиди [2]. В підтвердження цього твердження автори [8], свідчать, що додавання водню суттєво впливає на поліпшення екологічних показників відпрацьованих газів. В ході проведених експериментальних досліджень авторами було виявлено, що кількість викидів вуглеводнів (C_mH_n) знизилася на 40–50%, монооксиду вуглецю (СО) – на 15...25%. Поряд з цим зазначається, що викиди оксидів азоту NO_x збільшилися на 3...7%.

Підсумовуючи проведений аналіз, можна констатувати, що застосування водню у якості домішки до основного палива з ціллю часткового заміщення традиційного природного газу об'єктами побутового призначення є одним з перспективних напрямів є використання його в технологіях спалювання [1].

Мета дослідження. Основною метою даного дослідження є визначення впливу процентного

вмісту водню в паливній суміші з метаном на утворення оксидів азоту (NO_x), при використанні в штатних осьових пальниках водогрійного котла типу ДКВР-10-13. Також в роботі ставилась задача визначити середні характеристики теплообміну в топковій камері згаданого котельного агрегату за допомогою відомого пакету програм CFD-моделювання ANSYS-Fluent, що дозволяє після попередньої верифікації з експериментальними даними взятими з робіт інших авторів, розширити діапазони режимних параметрів, що можуть впливати на роботу котельного агрегату в цілому.

Методи, об'єкт та предмет дослідження. Метод дослідження – чисельний, за допомогою академічної ліцензії програмного комплексу ANSYS Student. Дана ліцензія є абсолютно безкоштовною (з 2015 року) і призначена для вирішення ознайомлювальних і освітніх задач в академічному середовищі.

Об'єкт дослідження – процеси, що протікають під час спалювання паливної суміші метану і водню в комп'ютерній моделі водогрійного котла типу ДКВР-10-13 оснащеного штатними осьовими пальниками.

Предмет дослідження – водогрійного котла типу ДКВР-10-13, оснащеного штатними осьовими пальниками ГМГ-4 без урахування топкових екранів. Габаритні розміри моделі становили $4,9 \times 2,6 \times 3,8$ м. Для побудови моделі використані дані з відкритих джерел [9]. Для прогнозування теплового NO_x використовується модель часткової рівноваги. В роботі прийнято, що процентне співвідношення вмісту водню до об'єму паливоповітряної суміші становить 10, 20, 30, 40 та 50%. При формуванні граничних умов врахована незмінність кількості теплоти, що вноситься в топку сумішшю.

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження виконувалось шляхом моделювання багатокомпонентних сумішей у середовищі програмного комплексу ANSYS-Fluent. Першим кроком створення CFD-моделі є розробка геометричної моделі. Геометрична модель водогрійного котла типу ДКВР-10-13, побудована згідно креслеників, опублікованих на сайті [5] без урахування топкових екранів представлена на рис. 2.

Моделі містить чотири штатних осьових пальника, для побудови геометричної моделі яких використані дані з відкритих джерел [8]. Згідно прийнятої геометричної моделі, подача первинного повітря в пальник здійснюється крізь бічний патрубок ДУ 159 мм (рис. 3а), яке в пальнику реагує з паливною сумішшю, яка також подається в пальник

через бічний патрубок того ж діаметру. Газорозподіл паливної суміші організовано круглими струменями, що подаються у потік окислювача перпендикулярною системою струменів (рис. 3б).

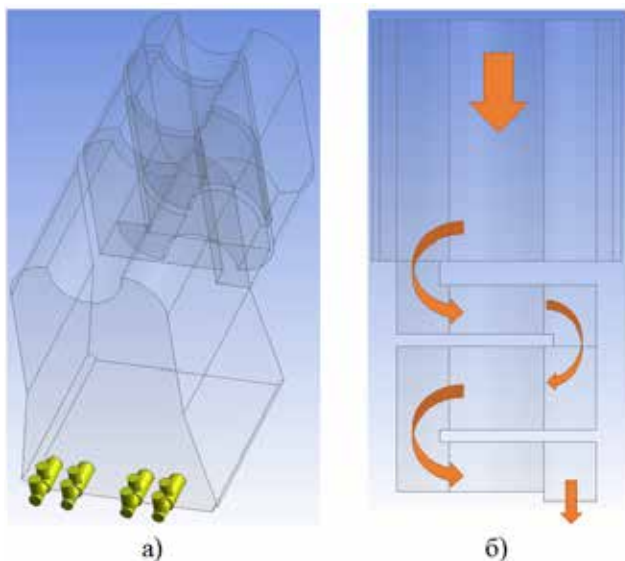


Рис. 2. Вид розрахункової області в ізометрії (а) та вид в плані (б) де показано напрям руху димових газів

Модель містить чотири штатних осевих пальника, для побудови геометричної моделі яких використані дані з відкритих джерел [8]. Згідно прийнятої геометричної моделі, подача первинного повітря в палиник здійснюється крізь бічний патрубок ДУ 159 мм (рис. 3а), яке в палинику реагує з паливною сумішшю, яка також подається в палиник через бічний патрубок того ж діаметру. Газорозподіл паливної суміші організовано круглими струменями, що подаються у потік окислювача перпендикулярною системою струменів (рис. 3б).

Для моделювання виконана дискретизація досліджуваної геометрії за допомогою розрахункових сіток, що побудована з використанням процедури CutCell meshing (рис. 4). Сітка CutCell – це загальна техніка шестигранної сітки. Алгоритм сітки CutCell підходить для широкого загалу розрахункових задач і завдяки великій частці шестиграних чарунок у сітці часто дає кращі результати, ніж звичайні тетраедричні сітки. Цей метод можна використовувати замість тетраедричної або шестигранної сітки, не вимагаючи дуже високоякісної поверхневої сітки як відправної точки. Крім того, цей метод використовує прямий поверхневий

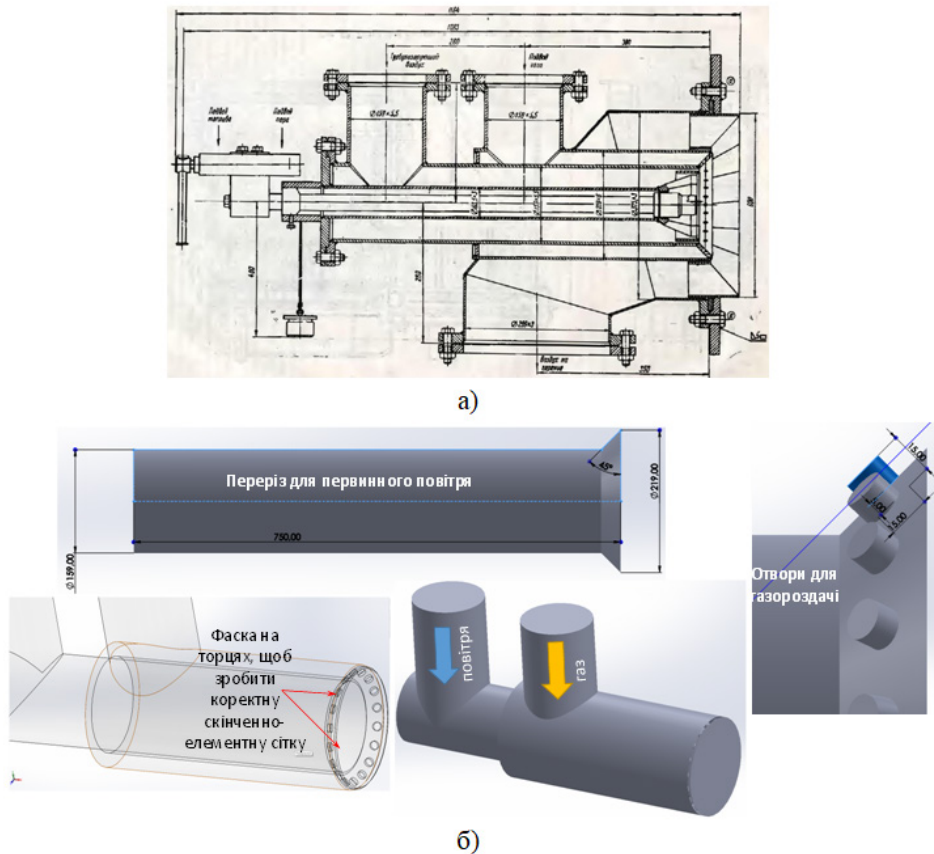


Рис. 3. Кресленник (а) і геометрична модель пальника (б) ГМГ-4

і об'ємний підхід без необхідності очищення чи декомпозиції, таким чином скорочуючи час, необхідний для створення сітки.

CFD-модель базується на чисельному рішенні усереднених по Рейнольдсу рівнянь Нав'є-Стокса, замкнутих за допомогою моделі турбулентності на основі концепції вихорової в'язкості типу $k-\varepsilon$ realizable [10]. це найкраща модель, з RANS-моделей, яка може розрахувати взаємодію між потоками. Ця модель отримана з рівняння переносу середньої завихорюваності, що в забезпечує більш обґрунтоване з гідродинамічної точки зору формування рівняння переносу швидкості дисипації, чим пояснюється використання в роботі цієї моделі. Крім того до переваг використання цієї моделі слід віднести той факт, що при використанні цієї моделі неможливо отримати негативні значення u_i^2 при значних деформаціях поля середньої швидкості. Автори [10] рекомендують використання даної моделі для течій з великою кривизною ліній току і закручуванням течії. Закручування потоку в даній задачі може відбуватись внаслідок гідродинамічної взаємодії між «факелом» полум'я з пальника і висхідним нагрітим потоком, що рухається в об'ємі топки котла.

Керуючі рівняння математичної моделі турбулентної течії, що має місце в цій задачі, і рівняння стандартної моделі турбулентності приведені в [11] і в інших підручниках з чисельних методів в гідродинаміці.

В налаштуванні гідродинамічної частини задачі окрім зазначеного, використано Enhance Wall Treatment для того, щоб врахувати пристінні функції і відповідно опції Viscous Heating, Correction і Full Buoyancy Effect (так звані ефекти плавучості).

Для моделювання багатокомпонентних сумішей використано модель Species Transport. Завдання різного процентного вмісту водню в паливній суміші з метаном $[H_2] = 0...50\%$ (до об'єму паливо-повітряної суміші) здійснено за допомогою відповідних налаштувань Mixture Species (рис. 5), де використовувались стехіометричні коефіцієнти з рівнянь взаємодії окислювач-паливо.

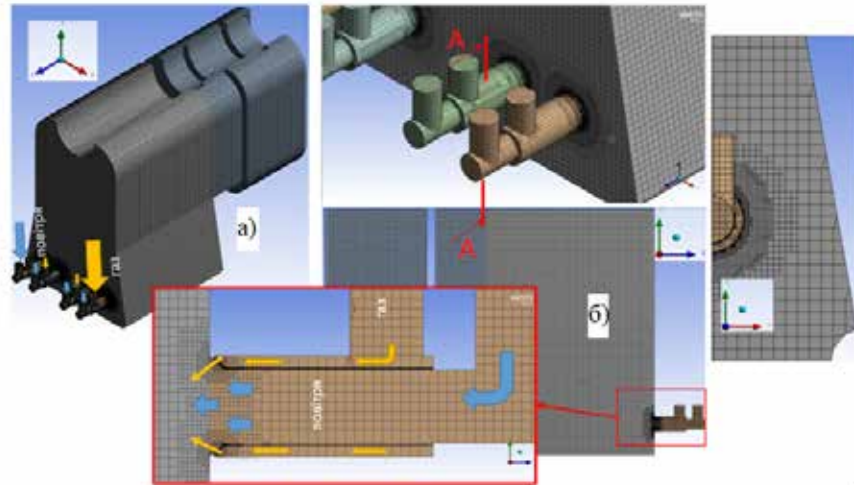


Рис. 4. Вид загальний скінченно-елементної сітки (а) та деталізація зображення «згущення» скінчених елементів поблизу моделі пальника (б)

Reactions $CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$

Mixture: methane-air Total Number of Reactions: 1

Reaction Name: reaction-1 ID: 1 Reaction Type: Volumetric Wall Surface Particle Surface Electrochemical

Number of Reactants: 2 Number of Products: 2

Species	Stoich. Coefficient	Rate Exponent	Species	Stoich. Coefficient	Rate Exponent
ch4	1	1	co2	1	0
o2	2	1	h2o	2	0

а)

Reactions $0.9CH_4 + 0.1H_2 + 1.85O_2 \rightarrow 0.9CO_2 + 1.9H_2O$

Mixture: mixture-template Total Number of Reactions: 1

Reaction Name: reaction-1 ID: 1 Reaction Type: Volumetric Wall Surface Particle Surface Electrochemical

Number of Reactants: 3 Number of Products: 2

Species	Stoich. Coefficient	Rate Exponent	Species	Stoich. Coefficient	Rate Exponent
ch4	0.9	1	co2	0.9	0
h2	0.1	1	h2o	1.9	0
o2	1.85	1			

б)

Рис. 5. Стехіометричні коефіцієнти у випадку спалювання метану (а) і спалювання метану з 10%-ю добавкою водню (б)

Теплофізичні властивості матеріалів в меню Create/Edit Material вибирались з врахуванням Kinetic Theory, тобто відповідно до молекулярно-кінетичної теорії.

В якості граничних умов на вході в пальник задавалися у вигляді масової витрати і температури (Mass flow inlet). причому у вкладці Species записувались фракції, що відповідають стехіометричним коефіцієнтам реакції. При формуванні граничних умов врахована незмінність кількості теплоти, що вноситься в топку сумішшю.

Що ж до граничної умови на виході з котла (outlet) згідно методики розрахунку багато-

компонентних сумішей засобами ANSYS-Fluent слід використовувати лише умову outflow. Ця умова показує яка частка витрат виходить через дану межу. Інші види доступних в ANSYS-Fluent граничних умов, наприклад, Pressure outlet, мають графу Species у якій потрібно записати масові або мольні долі реагуючих компонентів. А саме їх потрібно визначити за допомогою моделі, тому доступний один вибір – гранична умова outflow.

В якості гідродинамічних граничних умов на зовнішніх поверхнях котельного агрегату задавалося умова «прилипання» молекули газу до непроникної стінки (тобто рівності нулю всіх компонентів вектору швидкості). А в якості теплових – граничні умови третього роду, коли зовнішня поверхня котельного агрегату взаємодіє з навколишнім середовищем.

Оскільки моделюється задача взаємодії багатокомпонентних сумішей то в налаштуваннях метода рішення ANSYS-Fluent так зване поєднання тиску зі швидкістю визначено за допомогою процедури Couple. При цьому з врахуванням досить великої кількості завихрень необхідно використовувати умову Pseudo Transient, що забезпечить сталу збіжність нев'язок.

При моделюванні використовувалась стандартна методика прогнозування утворення NO_x засобами цього програмного комплексу. Засобами ANSYS-Fluent, розраховане утворення як теплових, так і швидких NO_x . Модель враховує турбулентно-хімічну взаємодію дозволяє обчислювати освіту NO_x з урахуванням впливу турбулентних пульсацій на осереднені за часом швидкості реакції. Для прогнозування концен-

трації радикала O, необхідної для прогнозування теплового NO_x використовується модель часткової рівноваги.

Обговорення отриманих результатів.

Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що розподіл температур димових газів в середині котельного агрегату і траєкторії руху потоку в області розташування пальника для всіх досліджених випадків процентного співвідношення вмісту водню до об'єму паливо-повітряної суміші є схожим. Приклад отриманих при розрахунках полів температур та швидкостей в топковій камері котла для випадку заміщення $[\text{H}_2] = 10\%$ (до об'єму паливо-повітряної суміші) представлено на рис. 6.

Аналіз розподілів температур, що приведені на рис. 5 свідчить, що максимальні значення температури які сягають $1500\text{ }^\circ\text{C}$ спостерігається саме в місці взаємодії струменів газороздачі і основного повітряного потоку. Це твердження справедливе також для всіх випадків вибраного для розрахунків процентного співвідношення вмісту водню до об'єму паливо-повітряної суміші. Проте слід зазначити, що при заміщенні метану воднем спостерігається зменшення температури в області, що межує з пальниками (рис. 7). Наприклад, на рис. 7 приведено залежність середньоінтегральної температури в топці водогрійного котла від вмісту H_2 в паливно-повітряній суміші. Ця залежність свідчить, що значення середньоінтегральної температури димових газів в об'ємі топки котла поступово знижуються від $1500\text{ }^\circ\text{C}$ у випадку використання метану, до $1000\text{ }^\circ\text{C}$ у випадку заміщення $[\text{H}_2] = 50\%$.

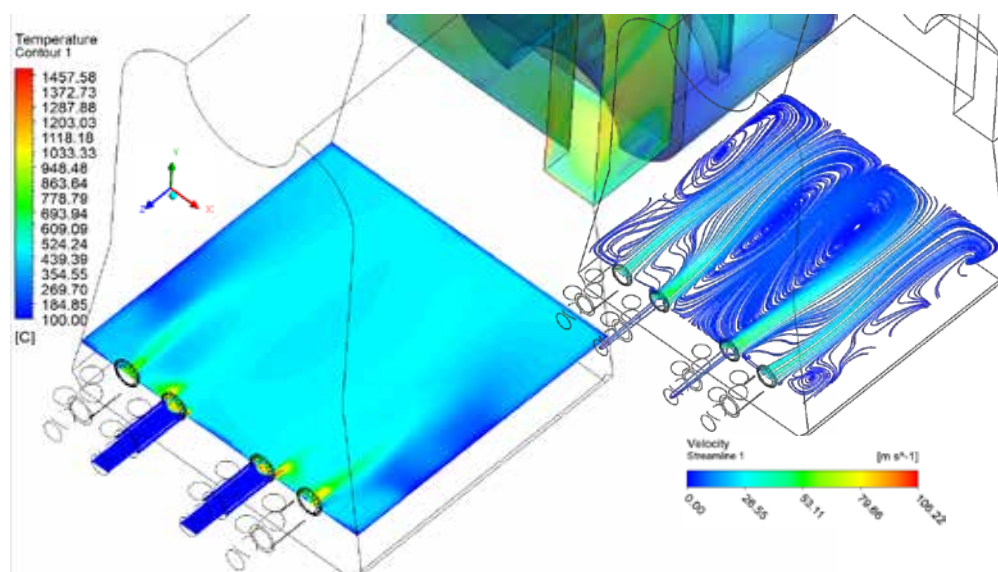


Рис. 6. Розподіл температур і швидкостей потоків продуктів згоряння в топковій камері котла ДКВР-10-13 у випадку спалювання метану

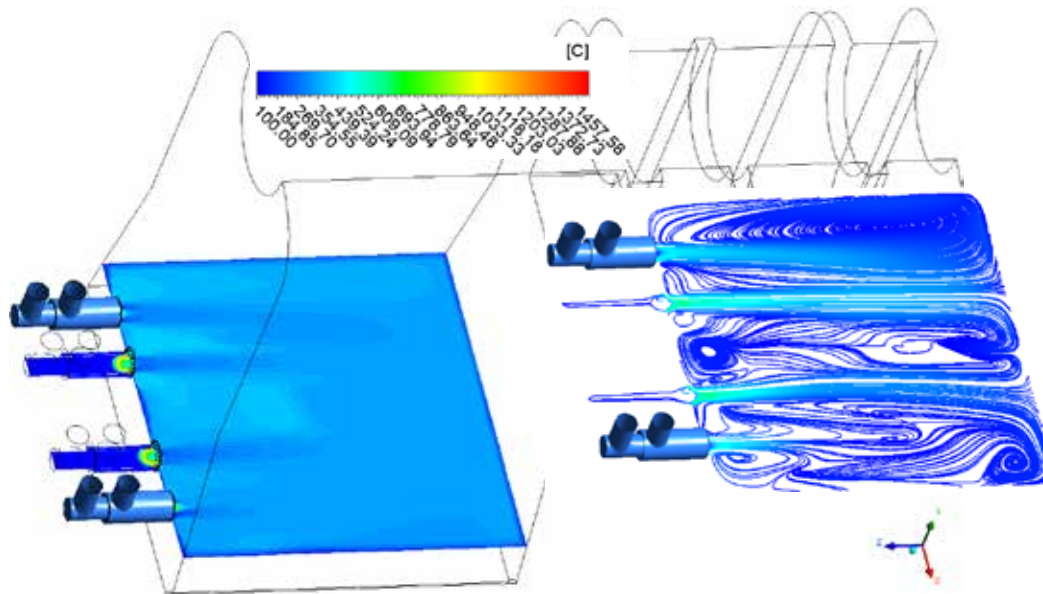


Рис. 7. Розподіл температур і швидкостей потоків продуктів згоряння в топковій камері котла ДКВР-10-13 у випадку спалювання метану з 50%-ю добавкою водню

На думку авторів, це пов'язано з відомим твердженням, що для водню, як палива, характерна більш низька теплотворна здатність ($Q_n^p = 10,79$ МДж/м³) та густина ($\rho = 0,09$ кг/м³) порівняно з природним газом ($Q_n^p = 35,9$ МДж/м³, $\rho = 0,72$ кг/м³), то при заміщенні останнього воднем знижується теплота згоряння сумішевого палива (віднесена до м³ суміші при нормальних умовах) порівняно з природним газом. Таким чином, для умови підтримки введеної в топку котла кількості теплоти збільшується витрата палива і змінюються режими роботи пальників.

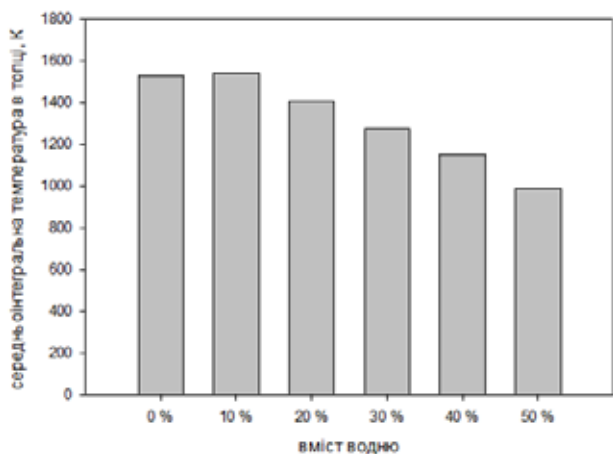


Рис. 8. Залежність середньої інтегральної температури в топці водогрійного котла від вмісту Н₂ в паливно-повітряній суміші

CFD-модель також дозволяє визначити розмір та конфігурацію «факелу», що виникає внаслідок

спалювання паливо-повітряної суміші. Так, наприклад, на рис. 8 приведено візуалізацію форми факелу і графіки розподілу температур в струмені потоку димових газів з пальників для випадку спалювання метану без домішок Н₂. Аналіз даних рис. 8 свідчить, що найбільш протяжними і теплонавантаженими є факели які розташовуються поблизу вісі симетрії котла. Значення температур струменя починає різко зменшуватися тільки на відстані 4 м від торця пальника. При цьому для пальників розташованих поблизу бічних стінок котельного агрегату різке зменшення значень температур струменя спостерігається вже на відстані 1,5 м від торця пальника. На думку авторів, на таку конфігурацію факелу полум'я може впливати той факт, що пальники № 1 і № 4 (для зручності на рис. 9 пальники пронумеровано) знаходяться поблизу стінки котельного агрегату, завдяки чому може спостерігатися перерозподіл теплового потоку для обігріву топочних екранів, а не нагрів середовища всередині об'єму топкової камери.

Приклад результатів моделювання утворення NO_x в топці котельного агрегату представлено в вигляді кількості частин на мільйон (промиле) – NO_x [ppm] для випадку заміщення [Н₂] = 10 % (до об'єму паливо-повітряної суміші) представлено на рис. 10.

Аналіз даних рис. 10 свідчить про те, що окисли азоту, які утворені в об'ємі топкової камери котельного агрегату під дією струменя нагрітих газів рухаються крізь конвективні поверхні нагрівання котла типу ДКВР і нікуди не зникають.

Якісно, картина утворення оксидів азоту для всіх досліджених за допомогою CFD-моделювання випадків заміщення метану воднем не змінна, але у кількісному значенні, збільшення значення заміщення $[H_2]$ до об'єму паливо-повітряної суміші призводить до зменшення емісії оксидів азоту.

Так, на рис. 10 приведені дані осереднення по поверхні перерізу виходу димових газів з котельного агрегату результатів CFD-моделювання генерації NO_x при різному процентному вмісту водню в паливній суміші з метаном $[H_2] = 0...50\%$ (до об'єму паливо-повітряної суміші). Аналіз приведених даних свідчить, що заміщення $[H_2] = 10\%$ в 2,9 рази зменшує значення NO_x . Подальше

збільшення частки $[H_2]$ до об'єму паливо-повітряної суміші призводить до поступового зменшення генерації NO_x , і вже при досягненні $[H_2] = 40\%$ значення осереднених NO_x по поверхні перерізу виходу димових газів з котельного агрегату не змінюються (рис. 11). На думку авторів це пояснюється тим, що водень «відбирає» ту частину кисню, що в іншому випадку може спровокувати генерацію оксидів азоту як у випадку спалювання «чистого» метану.

З метою порівняння результатів моделювання з відомими даними викидів оксидів азоту була проведена відповідна валідація CFD-моделі з даними режимної карти котла типу ДКВЕР-10-13. За даними режимної карти котла ДКВР 10-13 при

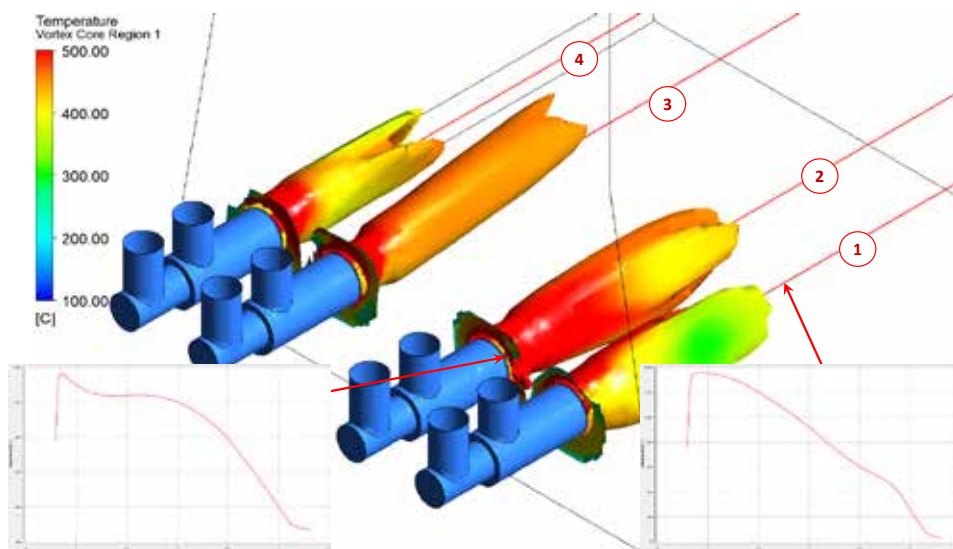


Рис. 9. візуалізацію форми факелу і графіки розподілу температур в струмені потоку димових газів з пальників для випадку спалювання метану в топковій камері котла ДКВР-10-13

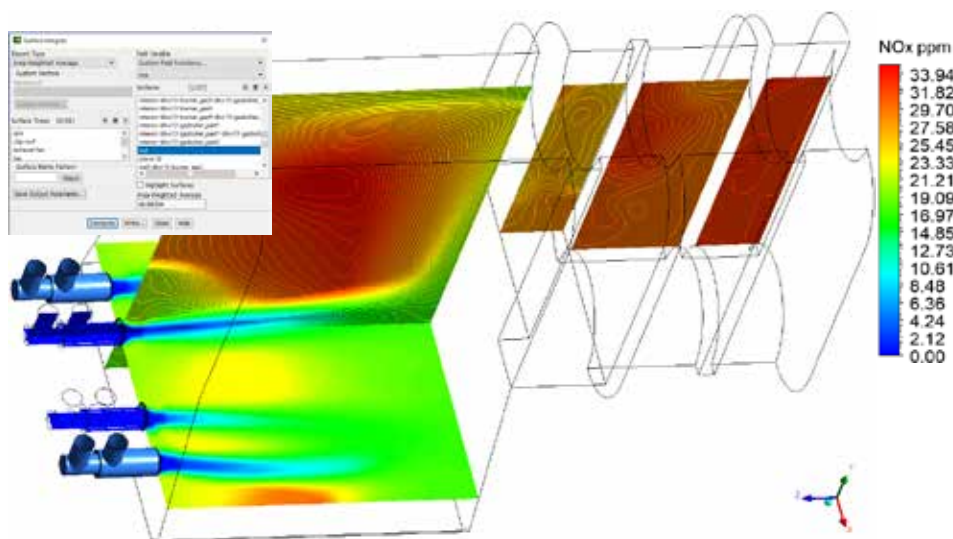


Рис. 10. Розподіл утворення оксидів азоту в топковій камері котла ДКВР-10-13 у випадку спалювання метану з 10% добавкою H_2

роботі на номінальній потужності рівень утворення NO_x складає $\sim 190\text{...}200$ мг/м³ (дані надано співробітником Інституту газу НАН України Горбуновим О.В.), що відповідає $\sim 95\text{...}100$ ppm. Даний рівень оксидів азоту добре співвідноситься з результатами CFD-моделювання, який для чистого метану склав 105 ppm.

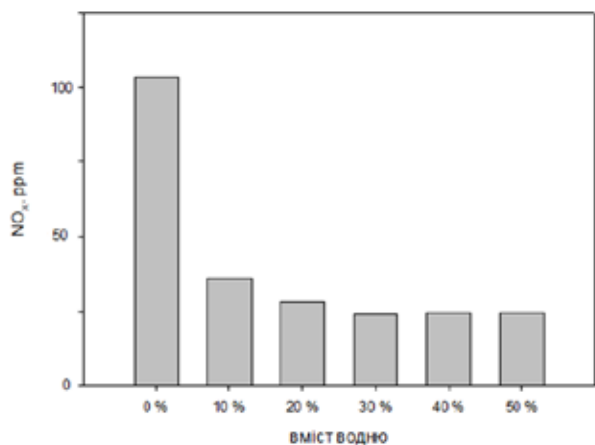


Рис. 11. Емісія оксидів азоту (NO_x , ppm) на виході з топкової камери водогрійного котла типу ДКВЕР-10-13 в залежності від процентного вмісту водню в паливній суміші з метаном

Аналіз отриманих за допомогою CFD-моделювання даних свідчить, що зі збільшенням процентного співвідношення вмісту водню в паливо-повітряній суміші емісія викиду оксидів азоту зменшується. Отриманий характер зменшення емісії оксидів азоту при заміщенні воднем метану у паливі відповідає характеру результатів експериментальних досліджень [7].

Висновки. На основі аналізу результатів CFD-моделювання процесів спалювання газоподібного палива в топці парового водотрубного котла ДКВЕР 10-13 за допомогою математичної моделі з використанням пакета прикладних програм ANSYS-Fluent визначено, що:

- використання відповідних розрахункових процедур є набагато простішим та дешевішим заходом порівняно з прямими фізичними експериментами та вимірюваннями;
- результат моделювання гідродинамічних характеристик струменів теплоносіїв котельного агрегату не залежить від хімічного складу суміші;
- значення середньоінтегральної температури димових газів в об'ємі топки котла поступово знижуються від 1500 °C, у випадку використання метану, до 1000 °C, у випадку заміщення $[\text{H}_2] = 50\%$.
- заміщення $[\text{H}_2] = 0\text{...}50\%$ (до об'єму паливо-повітряної суміші) дозволяє майже в 4 рази зменшити генерацію оксидів азоту в димових газах на виході з котельного агрегату.

• за даними режимної карти котла ДКВЕР 10-13 при роботі на номінальній потужності рівень утворення NO_x складає $\sim 190\text{...}200$ мг/м³, що відповідає $\sim 95\text{...}100$ ppm. Даний рівень оксидів азоту добре співвідноситься з результатами CFD-моделювання, який для чистого метану склав 105 ppm.

Таким чином комп'ютерне моделювання дозволяє проводити попередню, досить точну оцінку емісійних характеристик спалювання газоподібних палив різного складу. Отримані дані численних розрахунків можуть бути використані при проектуванні енергетичного обладнання.

Список літератури:

1. Yang H, Han YJ, Yu J, Kim S, Lee S, Kim G, Lee C. Exploring Future Promising Technologies in Hydrogen Fuel Cell Transportation. Sustainability. 2022; 14(2):917. <https://doi.org/10.3390/su14020917>.
2. Шльончак І. А., Павлов О. М.; Компанієць І. В. Аналіз ефективності використання водневмісного газу у двигунах внутрішнього згорання / А.І. Міщенко, А.В. Білогуб, В.Д. Савицький. та ін. *Матеріали VI-ї міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту», 12-13 квітня 2018 року: збірник наукових праць* / Міністерство освіти і науки України, Вінницький національний технічний університет [та інш.]. Вінниця: ВНТУ. 2018. 225 с.
3. von der Grün, G.T.M., Hotopp, S., Müller-Kirchenbauer, J. (2013). Transport and Usage of Hydrogen via Natural Gas Pipeline Systems. In: Hou, M., Xie, H., Were, P. (eds) Clean Energy Systems in the Subsurface: Production, Storage and Conversion. Springer Series in Geomechanics and Geoengineering. Springer, Berlin, Heidelberg. p.p 421–436 https://doi.org/10.1007/978-3-642-37849-2_33.
4. Mahajan, D.; Tan, K.; Venkatesh, T.; Kileti, P.; Clayton, C.R. Hydrogen Blending in Gas Pipeline Networks—A Review. Energies 2022, 15, 3582. <https://doi.org/10.3390/en15103582>.
5. Soroka B., Pyanykh K., & Zgurskyi V. (2022). Mixed Fuel for Household Gas-Powered Appliances as an Option to Replace Natural Gas with Hydrogen. Science and Innovation, 18(3), 10–22. <https://doi.org/10.15407/scine18.03.010>.
6. Заходи зі зниження негативного екологічного впливу при проектуванні та експлуатації транспортного комплексу. URL: https://pidru4niki.com/92979/ekologiya/sposobi_pidvischennya_ekologichnoyi_bezpeki_transporti. 05.09.2022 р.

7. Сірий О., Кобилянська О. CFD-модельовання процесу спалювання суміші метан-водень в струменево-нішевому стабілізаторі полум'я // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2021. № 4. Том 33 (72). С.172–180 DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/26>.

8. Тимошевський, М.Р. Ткач, Д.О. Шалапко Вплив на робочі характеристики ДВЗ домішок водню на основі рідкого палива / Тези доповідей: Міжнародна науково-технічна конференція. Суднова енергетика: стан та проблеми. 2011. С. 75 – 79.

9. ENERGETIK. Паровые котлы: котлы серии ДКВр давлением до 1,3 МПа (газ, мазут, уголь) ДКВр-4-1, ДКВр-6,5-13, ДКВр-10-13, ДКВр-20-13 URL: https://energetik.ua/catalog/parovi_kotly/dkvr-1-3/. – 29.09.2022 р.

10. Shih T.-H., Liou W. W., Shabbir A., Yang Z., Zhu J. A New $k-\epsilon$ EddyViscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows – Model Development and Validation. Computers and Fluids. 1995. Vol. 24, No 3. P. 227–238.

11. Ferziger, J.H., Peric, M. Computational methods fluid dynamics. Berlin: Springer, 2001. 423 p.

Baranyuk A.V., Vorobiov M.V., Ryabtsun R.S. DETERMINATION OF ENERGY AND ENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS OF THE DKVR-10-13 BOILER OPERATION IN ADDING HYDROGEN TO NATURAL GAS BY MATHEMATICAL MODELING

It's known that the traditional energy sector is primarily responsible for the generation of greenhouse gases. During the 150 years of its existence, the greenhouse effect has significantly increased, which has led to a climate crisis. Today, the problem of reducing the use of fossil hydrocarbons, in particular natural gas, is recognized in most countries of the world as a problem of national security. Various measures related to the effective use of alternative fuels and increasing the energy efficiency of thermal power facilities are being implemented to solve it.

Hydrogen technologies are increasingly being used to solve the mentioned problem. It is known that hydrogen is already widely used as automobile fuel [1]. The authors' works [2] show that the use of hydrogen in spark-ignition engines makes it possible to improve the quality of fuel combustion and improve their environmental performance. This, in turn, led to the use of hydrogen in the energy and utility sectors in the replacement of natural gas by admixing hydrogen into gas networks [3, 4].

The purpose of the work is to predict the formation of nitrogen oxides (NO_x) during the combustion of natural gas with added hydrogen in regular axial burners used in DKVR-10-13 type water heating boilers using computer modeling methods. An academic license of the ANSYS Student software complex was used for modeling, which since 2015 is free and is intended for solving introductory and educational tasks in an academic environment.

During the simulation, it was determined that the percentage of hydrogen in the fuel mixture with methane [H₂] = 30% (to the volume of the fuel-air mixture) allows to reduce the generation of NO_x by 3.7 times compared to the case of burning methane. A further increase in [H₂] to 40 and 50% does not lead to a decrease in NO_x formation.

Preliminary verification of the calculated data of nitrogen oxide emissions with the data of the mode map of the DKVER-10-13 type boiler for the case of methane combustion was carried out. The result of the comparison shows that the model developed in the ANSYS-Fluent environment slightly overestimates the value of NO_x at the boiler outlet. This may be due to the imperfection of the computer model compared to the real object. However, the tendency of the dependence of the value of nitrogen oxide emissions at the exit from the boiler on the percentage of hydrogen fully corresponds to the similar dependence for the household two-circuit boiler «MICRA DUO CS 24» of the company «RÖDA» [5], which indicates the feasibility of using hydrogen as a partial replacement of traditional natural gas fuel burning equipment.

Key words: hydrogen energy, emission, methane-hydrogen mixture, modeling, vorticity, nitrogen oxides.