

УДК 536.24:533.6.011

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/23>**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.В.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**МОДЕЛЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОБОТИ  
КОТЛА ДКВР-10-13 ПРИ ВИКОРИСТАННІ МЕТАНО-ВОДНЕВОЇ  
СУМІШІ ЯК ПАЛИВНОГО ГАЗУ**

В сучасному світі існує актуальна проблема зниження генерації парникових газів і послаблення парникового ефекту яка зумовлює необхідність істотного удосконалення процесів перетворення енергії і підвищення техніко-економічних характеристик систем енергопостачання на їх основі. Вирішити цю проблему здатні інноваційні водневі технології, які покликані зіграти важливу роль в диверсифікації потоків енергоносіїв, що істотно зменшить споживання вуглеводневих палив і дозволить поліпшити стан навколишнього середовища.

Дослідження та розробки, що пов'язані з використанням водню у якості палива на сьогоднішній день є надзвичайно актуальними. Найбільш поширеною є ідея використання спалювання водню у суміші з природним газом для забезпечення декарбонізації атмосфери та зменшення впливу на глобальні кліматичні зміни шляхом скорочення викидів вуглекислого газу з продуктами згорання вуглеводневого палива [1].

Робота присвячена визначенню залежності викидів  $NO_x$  водогрійному котлі типу ДКВР-10-13, що оснащений штатними осьовими пальниками від витрат метано-водневої суміші в якості палива. В роботі прийнято, що процентне співвідношення вмісту водню до об'єму паливо-повітряної суміші становить 10, 20, 30, 40 і 50%. На основі аналізу температурних полів і гідродинамічної картини потоку поблизу пальників зроблено висновок щодо умов досягнення сталої теплової потужності пальників, режимів їх роботи і принципів забезпечення від шкідливих явищ проскоку, відриву полум'я та неповноти згорання палива.

В ході моделювання визначено, 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  $[NO_x]$  зростає від 16,4 (37 м<sup>3</sup>/год) до  $[NO_x] \approx 24$  ppm (при 185 м<sup>3</sup>/год).

Попередньо проведена верифікація розрахункових даних викидів окислів азоту з даними режимної карти котла типу ДКВР-10-13 для випадку спалювання метану. Результат порівняння свідчить, що модель розроблена в середовищі ANSYS-Fluent децю завищує значення  $NO_x$  на виході з котла, 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.** При дослідженні можливості використання водню в якості часткової заміни традиційного природного газу паливос-

палюючим устаткуванням, основним питанням є визначення можливої і допустимої частки водню у таких горючих сумішах. Вирішення цього

питання є компромісом між намаганням, з однієї сторони, збільшити частку водню, як заміника природного газу, а з іншої – забезпечити основні принципи безпеки і ефективності використання таких сумішей, а також мінімізації інвестицій, які необхідні для переходу газоспалювальних і топкових пристроїв з чистого природного газу, для якого вони були призначені, на горючу суміш природного газу і водню. [1-3].

В роботі [4] приведений висновок про те, що у випадку спалювання метано-водневої суміші в пальнику, в якому реалізована технологія струменово-нішевого спалювання, засобами CFD-моделювання встановлено, що додавання водню в об'ємі від  $\frac{1}{4}$  до  $\frac{1}{2}$  збільшує емісію  $\text{NO}_x$  на 27%. Автори роботи [3], які експериментально дослідили процес спалювання метано-водневої суміші в побутовому двоконтурному котлі «MICRA DUO CS 24» фірми «RÖDA» і зробили що викиди  $\text{NO}_x$  збільшуються із зростанням витрат палива.

Автори представленої роботи в своїх раніше проведених дослідженнях зробили той же висновок, проте в їх роботі не було досліджень присвячених впливу витрати метано-водневої суміші на утворення окислів азоту ( $\text{NO}_x$ ) в CFD-моделі водогрійного котла типу ДКВР-10-13, оснащеного штатними осьовими пальниками.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розвиток цивілізації призводить до невинного споживання енергії. Внаслідок цього значно збільшується антропогенне забруднення довкілля, значна частина якого в'язана із викидами промислових і енергетичних підприємств, транспорту, житлово-комунальних господарств й інших галузей економіки.

Одним із способів досягнення низьких рівнів шкідливих речовин є додавання до паливо-повітряної суміші газоподібного водню. Для класичної теорії і практики спалювання горючого газу питання взаємозамінності двох різних горючих газів не є новим. У різних країнах до цього питання приходили тоді, коли виникала альтернатива використання основного горючого газу, наприклад природного. Такою альтернативною міг бути біогаз, генераторний газ, нафто заводський газ, скраплений пропан-бутан, скраплений природний газ (LNG) і інші горючі гази та їх суміші. Такою альтернативою може бути також водень, або горючі суміші водню із іншими газами [1]. В підтвердження цього твердження у серпні 2020 року в Україні стартував Водневий проект Регіональної газової компанії [5] і розпочалися випробування сумішей природного газу та водню

для використання у газорозподільних мережах. Як висновок представлено твердження – якщо використати суміш з 20% водню, то можна заощадити на рік 6 млрд кубометрів природного газу, а якщо у суміші 50% водню, то економія – 15 млрд кубів.

Проте, слід враховувати, що метан (доля якого в природному газі становить більше 85%) і водень мають надзвичайно велику відмінність у горючих характеристиках, що спричиняє повну відсутність їх взаємозамінності. Витрати повітря для повного згорання і об'єм продуктів згорання відрізняються у 4 рази, швидкість розповсюдження полум'я – у 7 разів, кількість первинного повітря, яка гарантує горіння без проскоку відрізняється у 4 рази. Порівняння індексів взаємозамінності Воббе для метану і водню підтверджує факт неможливості переведення пальників на природному газі на водень – відмінність індексу Воббе для цих газів становить 15%, що у 3 рази перевищує нормовану величину 5%. Забезпечити перехід роботи пальника з природного газу на водень без змін у конструкції пальника і без втрати теплової потужності установки неможливо [1]. Такі висновки зроблені автором [1] шляхом дослідження, що проведені при спалюванні нафто-заводського газу на Кременчуцькому Нафтопереробному заводі із змінною складовою водню від 20% до 54% об., свідчать про те, що спалювання газів із значною кількістю водню призводить до кардинальних змін у роботі газопальникових пристроїв і масовому переходу їх роботи у режим проскоку полум'я. Змінюється також емісійна тепловіддача факелів і конвективний теплообмін на поверхнях нагрівання.

Автори роботи [3], що 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» роблять висновок, що викиди  $\text{NO}_x$  збільшуються із зростанням витрат палива. Водночас зберігається тенденція суттєвого зменшення викидів в усьому діапазоні варіювання теплової потужності (паливоспоживання) із збільшенням вмісту  $\text{H}_2$ , в тому числі – для випадку максимально випробуваного вмісту  $[\text{H}_2]$  в паливі ( $[\text{H}_2] = 50\%$ ).

Автор [1] зауважує, що забезпечити перехід роботи пальника з природного газу на горючу суміш з умістом водню більше за 20–25% без внесення змін в конструкцію пальника і режим його роботи, а також конструкцію і режим роботи тяго-дутьових пристроїв установки неможливо

з міркувань забезпечення сталості теплової потужності і оптимальних параметрів роботи установки. Але, крім цього, є ще одна складова цього питання. Це зміна характеру теплообміну у топкових пристроях, які будуть працювати на газах – заміниках з підвищеним умістом водню. Так наприклад, при переході на спалювання суміші з умістом водню до 30% об. об'єм продуктів згорання зменшується з  $11,95 \text{ м}^3/\text{м}^3$  до  $7,59 \text{ м}^3/\text{м}^3$  з одночасним зменшенням умісту  $\text{CO}_2$  у складі продуктів згорання. Ці два фактори призведуть до погіршення теплообміну у топках теплогенеруючих агрегатів.

Отже, питання застосування водню у якості домішки до основного палива з метою часткового заміщення традиційного природного газу об'єктами побутового призначення є одним з перспективним і дискусійним.

**Мета дослідження.** Основною метою даного дослідження є визначення енергетичної ефективності та викидів шкідливих речовин під час спалювання метано-водневої суміші в комп'ютерній моделі водогрійного котла типу ДКВР-10-13 оснащеного штатними осьовими пальниками 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 вирі-

шення ознайомлювальних і освітніх задач в академічному середовищі.

Для моделювання використовувалась академічна ліцензія програмного комплексу ANSYS Student яка з 2015 року є абсолютно безкоштовною 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 – водогрійний котел типу ДКВР-10-13, оснащений штатними осьовими пальниками 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 [6]. Для прогнозування теплового  $\text{NO}_x$  використовується модель часткової рівноваги. В роботі прийнято, що процентне співвідношення вмісту водню до об'єму паливоповітряної суміші становить 10, 20, 30, 40 і 50%. При формуванні граничних умов врахована незмінність кількості теплоти, що вноситься в топку сумішшю.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Представлена робота є продовженням раніше опублікованого дослідження [7]. Відмінність – визначення теплових і екологічних характеристик процесів, що мають місце під час спалювання паливної суміші метану і водню в комп'ютерній моделі водогрійного котла типу ДКВР-10-13 в залежності від зміни потужності котельного агрегату (100% від номінальної, 80%, 60%, 40%

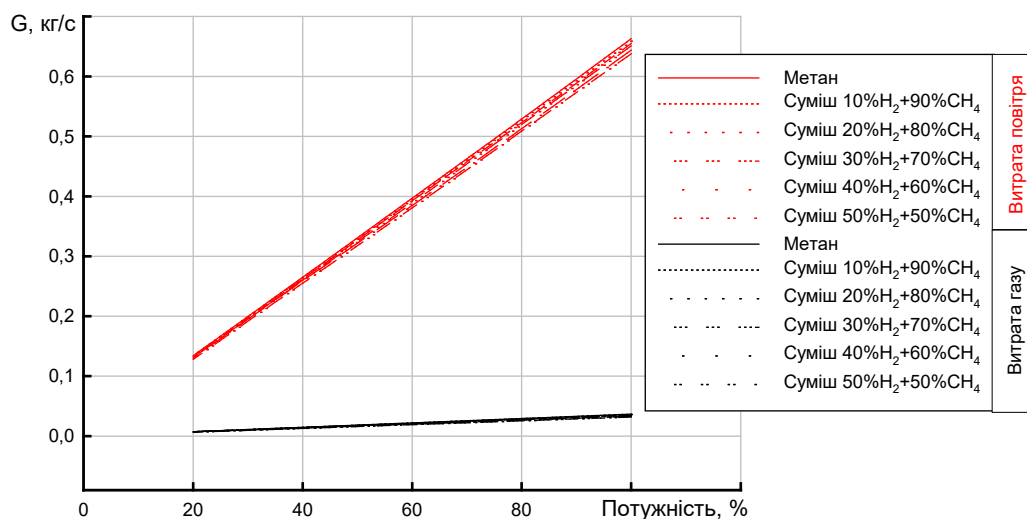


Рис. 1. Залежність витрати газу та повітря в залежності від зміни потужності котельного агрегату

і 20%). Зменшення потужності призводить до зміни витрат газу і повітря (рис. 1), при чому співвідношення між якими визначається незмінністю кількості теплоти, що вноситься в топку сумішшю. Послідовність розрахунку для визначення згаданих витрат паливо-повітряної суміші і первинного повітря описано в [7].

Як свідчать дані, що приведені на рис. 1 для забезпечення умови незмінності кількості теплоти яка вноситься в топку сумішшю, склад паливо-повітряної суміші майже не впливає на зміну її витрати. Теж саме стосується і витрати повітря на низьких рівнях потужності (20 і 40% від номінальної). Збільшення потужності призводить до більшого розшарування між даними витрати повітря зі збільшенням значення заміщення  $[H_2]$ . Проте, слід зазначити для випадку номінальної потужності котельного агрегату заміщення  $[H_2] = 10\%$  (до об'єму паливо-повітряної суміші) зменшує витрату суміші порівняно з метаном всього лише на 0,6%. При подальшому збільшенні величини заміщення  $[H_2]$  на 20, 30 40 і 50% ця цифра становить 1,2; 1,8; 3 і 3,9% відповідно.

На рис. 2 представлено значення викидів  $NO_x$  [ppm], для комп'ютерної моделі котла типу ДКВР-10-13 в залежності від витрат палива, кг/с. Розшаровуючим параметром на графіку служить співвідношення  $[H_2]/[CH_4]$  в паливній суміші.

Для верифікації результатів моделювання використовувалась режимна карта котла типу ДКВР-10-13 підготовлена співробітником Інституту газу НАН України Горбуновим О.В. Згідно режимної карти котла ДКВР 10-13 при роботі на номінальній потужності рівень утворення  $NO_x$  складає  $\sim 190 \dots 200$  мг/м<sup>3</sup>, що відповідає  $\sim 95 \dots 100$  ppm. Як свідчить рис. 2, на номі-

нальній потужності котельного агрегату рівень  $NO_x$  для випадку спалювання чистого метану склав 105 ppm, що узгоджується з даними режимної карти.

Рис. 2 свідчить, що зменшення потужності котельного агрегату і відповідно витрати палива, призводять до зменшення викидів  $NO_x$ . Представлені на цьому рисунку дані свідчать, що заміщення метану воднем сприяє зменшенню генерації в середньому в 6-ть разів порівняно з випадком спалювання метану. При цьому із збільшенням вмісту  $H_2$ , спостерігається тенденція до зменшення викидів в усьому діапазоні варіювання теплової потужності. Так, наприклад, заміщення  $[H_2] = 20\%$  збільшує емісію  $[NO_x]$  від 20 при витраті палива 0,0141 кг/с, що відповідає 20% номінальної потужності до  $[NO_x] \approx 28,6$  ppm при витраті палива 0,0352 кг/с, що відповідає 20% номінальної потужності.

На рис. 3 та 4 приведені результати CFD-моделювання генерації  $NO_x$  для випадку спалювання палива з процентним вмістом водню в паливній суміші з метаном  $[H_2] = 10\%$  (до об'єму паливо-повітряної суміші (рис. 3) та  $[H_2] = 50\%$  (рис. 4).

Аналіз результатів моделювання свідчить про те, що картини візуалізації генерації окислів азоту для всіх досліджених випадків заміщення метану воднем подібні. Ця подібність виражається в тому, що генерація окислів азоту найбільш інтенсивна поблизу струменя нагрітих газів, а не безпосередньо в ньому. Також для всіх досліджених випадків подібним є те, що 2/3 об'єму топки котла в димових газах має максимальну концентрацію  $NO_x$ . Далі відбувається перемішуванні потоків і в конвективній шахті потік  $NO_x$  однорідний.

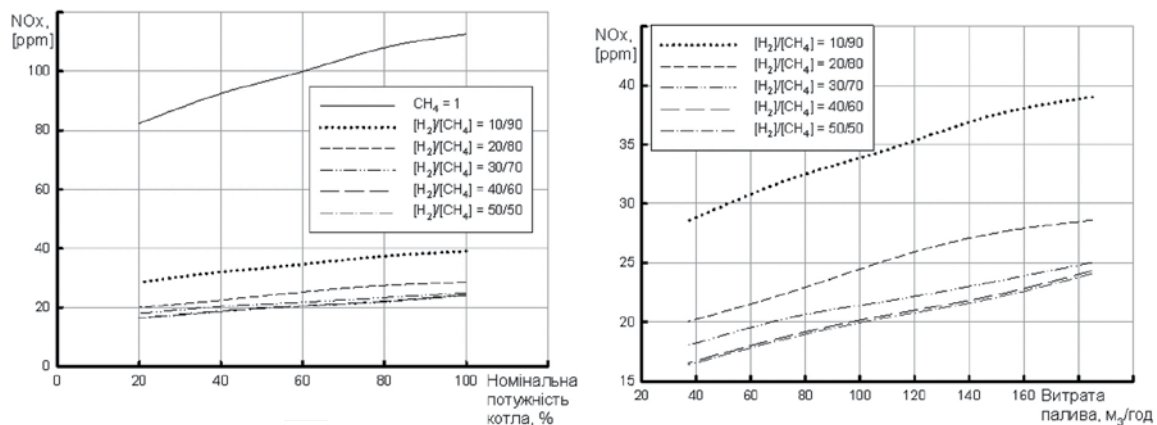


Рис. 2. Генерація  $NO_x$ , [ppm] на виході з топкової камери водогрійного котла типу ДКВР-10-13 в залежності від номінальної потужності (а) і від витрат палива, м<sup>3</sup>/год (б)

Представлений на рис. 4 розподіл свідчить про залежність генерації окислів азоту від витрати паливо-повітряної суміші на один паливник.

Слід зазначити, що збільшенням вмісту  $H_2$ , більше 50% не призведе до зменшення генерації окислів азоту. Оскільки у випадку заміщення  $[H_2] = 40\%$  (до об'єму паливо-повітряної суміші) концентрація  $[NO_x]$  зростає від 16,5 до 24,3 ppm, що відповідає витратам палива 37 і 185  $m^3/год$  або 20 і 100% номінальної потужності котла. В той же час, випадку заміщення  $[H_2] = 50\%$  концентрація  $[NO_x]$  зростає від 16,4 до 24 ppm, що відповідає витратам палива 37 і 185  $m^3/год$  або 20 і 100% номінальної потужності котла.

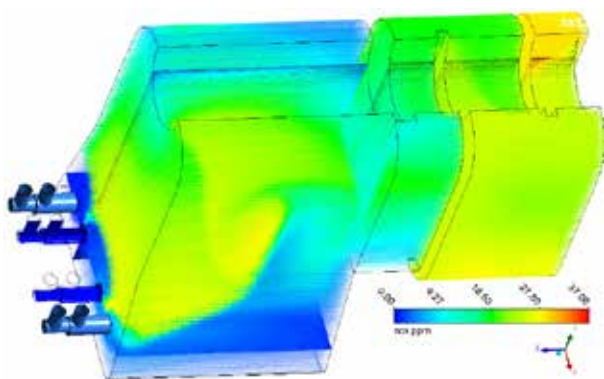


Рис. 3. Розподіл окислів азоту в топковій камері котла ДКВР-10-13 у випадку спалювання метану з 10%-ю добавкою водню для номінальної потужності

**Обговорення отриманих результатів.** Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що збільшення значення заміщення  $[H_2]$  до об'єму паливо-повітряної суміші призводить до зменшення емісії окислів азоту.

Так, згідно даних 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  $[H_2] = 0 \dots 50\%$  (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. На думку авторів це пояснюється тим, що водень «відбирає» ту частину кисню, що в іншому випадку може спровокувати генерацію окислів азоту як у випадку спалювання «чистого» метану.

Аналіз отриманих за допомогою CFD-моделювання даних свідчить, що зі збільшенням процентного співвідношення вмісту водню в паливо-повітряній суміші емісія викиду окислів азоту зменшується. Отриманий характер зменшення емісії окислів азоту при заміщенні воднем

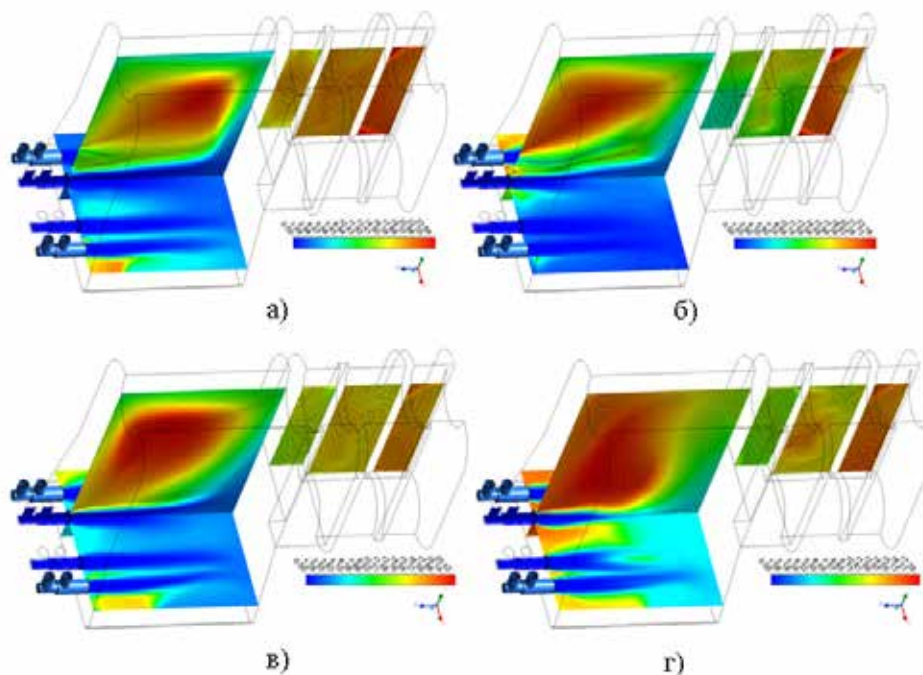


Рис. 4. Розподіл утворення окислів азоту в топковій камері котла ДКВР-10-13 у випадку спалювання метану з 50%-ю добавкою водню при зміні витрати палива: а) 148  $m^3/год$ ; б) 111  $m^3/год$ ; в) 74  $m^3/год$ ; г) 37  $m^3/год$



метану у паливі відповідає характеру результатів експериментальних досліджень [3].

**Висновки.** На основі аналізу результатів CFD-моделювання процесів спалювання газоподібного палива в топці парового водотрубного котла ДКВР 10-13 за допомогою CFD-моделі з використанням академічної ліцензії програмного комплексу ANSYS Student визначено, що:

- верифікація CFD-моделі виконана за допомогою режимної карти котла ДКВР 10-13, яку надав співробітник Інституту газу НАН України Горбуновим О.В. Згідно даних режимної карти, при роботі на номінальній потужності рівень утворення  $\text{NO}_x$  складає  $\sim 190 \dots 200 \text{ мг/м}^3$  (дані), що відповідає  $\sim 95 \dots 100 \text{ ppm}$ . Даний рівень оксидів азоту добре співвідноситься з результатами CFD-моделювання, який для чистого метану склав  $105 \text{ ppm}$ ;
- заміщення  $[\text{H}_2] = 0 \dots 50\%$  (до об'єму паливоповітряної суміші) дозволяє майже в 4 рази змен-

шити генерацію окислів азоту в димових газах на виході з котельного агрегату;

- заміщення метану воднем сприяє зменшенню генерації в середньому в 6-ть разів порівняно з випадком спалювання метану;
- визначено, що викиди  $\text{NO}_x$  збільшуються із зростанням витрат палива. Водночас зберігається тенденція суттєвого зменшення викидів в усьому діапазоні варіювання теплової потужності із збільшенням вмісту  $\text{H}_2$ ;
- встановлено, що перевищення вмісту  $[\text{H}_2]$  більше 50% не призведе до суттєвого зменшення викидів  $\text{NO}_x$ .

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. Колієнко А.Г. Використання сіміші природного газу і водню як палива в комунально-побутових промислових паливопалювальних теплогенеруючих установках // Нетрадиційні технології, 2021, № 4(52), С. 25–30.
2. Карп І.М., П'яних К.Є. Возможні обсяги економії та заміщення природного газу в Україні // Енерго-технологии и ресурсосбережение, 2012., № 1. С. 16–22.
3. 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>.
4. Сірий О., Кобилянська О. CFD-моделювання 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>.
5. Як Україна переходить на водень. Підсумки 2021 року. [Електронний ресурс] – Режим доступу: [https://glavcom.ua/new\\_energy/publications/yak-ukrajina-perehodit-na-voden-pidsumki-2021-roku-810809.html](https://glavcom.ua/new_energy/publications/yak-ukrajina-perehodit-na-voden-pidsumki-2021-roku-810809.html). – 05.01.2023 р.
6. 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 [Електронний ресурс] – Режим доступу: [https://energetik.ua/catalog/parovi\\_kotly/dkvr-1-3/](https://energetik.ua/catalog/parovi_kotly/dkvr-1-3/). – 05.01.2023 р.
7. Баранюк О.В., Воробйов М.В., Рябцун Р.С. Визначення енергетичних та екологічних характеристик роботи котла ДКВР-10-13 при додаванні водню до природного газу методом математичного моделювання / Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І Вернадського. Серія: Технічні науки, Том 33 (72) № 5, 2022, С. 183–192.

#### **Baranyuk A.V., Vorobiov M.V., Ryabtsun R.S. SIMULATION OF ENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS OF DKVR-10-13 BOILER OPERATION USING METHANE-HYDROGEN MIXTURE AS FUEL GAS**

*In the modern world, there is an urgent problem of reducing the generation of greenhouse gases and weakening the greenhouse effect, which necessitates a significant improvement of energy conversion processes and an increase in the technical and economic characteristics of energy supply systems based on them. This problem can be solved by innovative hydrogen technologies, which are designed to play an important role in the diversification of energy flows, which will significantly reduce the consumption of hydrocarbon fuels and improve the state of the environment.*

*Research and development related to the use of hydrogen as a fuel is extremely relevant today. The most widespread idea is the use of burning hydrogen in a mixture with natural gas to ensure de-carbonization of the atmosphere and reduce the impact on global climate change by reducing carbon dioxide emissions with hydrocarbon fuel combustion products [1].*

*The work is devoted to the determination of the dependence of NO<sub>x</sub> emissions of a DKVR-10-13 type water heating boiler equipped with standard axial burners on the consumption of methane-hydrogen mixture as fuel. In the work, it is assumed that the percentage ratio of hydrogen content to the volume of the fuel-air mixture is 10, 20, 30, 40 and 50%. On the basis of the analysis of temperature fields and the hydrodynamic picture of the flow near the burners, a conclusion was made regarding the conditions for achieving a stable thermal power of the burners and the principles of protection against the harmful phenomena of flashback, flame separation, and incomplete combustion of fuel.*

*In the course of modeling, it was determined that NO<sub>x</sub> emissions increase with increasing fuel consumption. At the same time, there is a trend of a significant decrease in emissions in the entire range of variation of thermal power (fuel consumption) with an increase in the H<sub>2</sub> content, including for the case of the maximum tested content of [H<sub>2</sub>] in the fuel ([H<sub>2</sub>] = 50%). For such fuel, the concentration of [NO<sub>x</sub>] increases from 16.4 (37 m<sup>3</sup>/h) to 24 ppm (at 185 m<sup>3</sup>/h).*

*Preliminary verification of the calculated data of nitrogen oxide emissions with the data of the mode map of the DKVR-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<sub>x</sub> at the boiler outlet, which indicates the feasibility of using hydrogen as a partial replacement of traditional natural gas with fuel-burning equipment.*

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