

ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.181.27

doi: 10.31498/2225-6733.40.2020.216221

© Колбасенко О.В.*

**ВПЛИВ СПОСОБІВ ВВОДУ ВОДИ В ПОЛУМ'Я НА ЕФЕКТИВНІСТЬ
ГОРІННЯ І ВИКИДИ ОКСИДІВ АЗОТУ**

Порівняння процесів горіння рідких палив при різних способах вводу води в зону горіння показали, що зі зростанням кількості води, що вводиться, від 2% при спалюванні мазуту до 30% при спалюванні водопаливної емульсії з водовмісткістю $W^r = 30\%$, підвищується якість горіння: зростає концентрація CO і H_2 в процесі пірогенетичних реакцій і знижується концентрація оксидів азоту. Підвищення якості горіння при спалюванні емульсії пояснюється тим, що при спалюванні емульсії під впливом мікрровибхів її крапель збільшуються концентрації $(CO + H_2)$ і атомів водню зі значними відновлювальними якостями, покращуються умови термічного розкладання оксидів азоту і зростає інтенсивність акустичних коливань.

Ключові слова: вода в зоні горіння, водопаливна емульсія, мікрровибхи, відновлювальні якості, термічний розклад, акустичне коливання.

Колбасенко О.В. Влияние способов ввода воды в пламя на эффективность горения и выбросы оксидов азота. Сравнение процессов горения жидких топлив при разных способах ввода воды в зону горения показали, что с увеличением количества вводимой воды от 2% при сжигании мазута до 30% при сжигании водотопливной эмульсии с водосодержанием $W^r = 30\%$, повышается качество горения: увеличивается концентрация CO и H_2 в процессе пирогенетических реакций и снижается концентрация оксидов азота. Повышение качества горения при сжигании эмульсий объясняется тем, что при сжигании эмульсии под действием микровзрывов ее капель увеличиваются концентрации $(CO + H_2)$ и атомов водорода со значительными восстановительными свойствами, улучшаются условия термического разложения оксидов азота и увеличивается интенсивность акустических колебаний.

Ключевые слова: вода в зоне горения, водотопливная эмульсия, микровзрывы, восстановительные свойства, термическое разложение, акустические колебания.

O.V. Kolbasenko. Influence of methods of introducing water into the flame on combustion efficiency and nitrogen oxide emissions. The paper presents the results of comparative studies of the combustion quality and the values of the nitrogen oxides concentrations during the combustion of fuel oil M40, with the injection of water vapor into its combustion zone and burning water-fuel emulsions with water content $W^r = 15\%$ and 30% , carried out on an experimental installation. The analysis of the obtained data showed that when burning the aqueous fuel emulsion with $W^r = 30\%$, the best combustion quality indicators were obtained, the indicators were estimated from the values of CO, H_2 concentrations and the sum $(CO + H_2)$ in the combustion chamber zone. An increase in CO, H_2 and $(CO + H_2)$ concentrations results in a decrease in the level of NO_x , NO and NO_2 and an increase in the $NO_2:NO$ ratio up to 0,33 when burning emulsion with $W^r = 30\%$, which leads to a significant increase in the absorption properties of sulfuric acid and a decrease in the intensity of low-temperature sulfuric acid corrosion, which makes it pos-

* PhD студент, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

sible the use of condensation low-temperature heating surfaces when burning emulsions based on sulfur fuel oil with $W^r = 30\%$ and to increase the efficiency of boilers. Comparison of the combustion quality when water vapor is introduced and burning emulsions with $W^r = 30\%$, while taking into account the literature data, made it possible for us to assume that a decrease in NO_x emissions and an increase in the $NO_2:NO$ ratio due to a higher concentration ($CO + H_2$), the appearance of hydrogen atoms with significant restoration properties, improved conditions for thermal decomposition of NO_x and an increasing intensity of acoustic vibration due to the sequence of microexplosions of droplets of water-fuel emulsions. Experimental studies have shown that water-fuel emulsions are not just products of mixing hydrocarbon fuel and a chemically inert liquid, but a completely special type of fuel that qualitatively and quantitatively changes the physico-chemical processes of combustion.

Keywords: water in the combustion zone, water-fuel emulsion, microexplosions, restoration properties, thermal decomposition, acoustic vibrations.

Постановка проблеми. Для вирішення проблем, що склалися, пов'язаних з підвищенням вартості палива, захистом навколишнього середовища, великого значення набувають заходи, спрямовані одночасно як на зниження емісії шкідливих речовин, так і на підвищення економічності суднових енергетичних установок (СЕУ) за рахунок поліпшення процесів горіння. В теплоенергетиці в даний час одним з найбільш ефективних і економічних методів зниження концентрацій оксидів азоту вважається термохімічний. Подача води в реакційну зону в основному здійснюється двома способами: шляхом вприскування в повітря або в ядро факела пари або води і шляхом застосування водопаливних емульсій (ВПЕ).

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Згідно з опублікованими даними [1-3] прискорювальна дія водяної пари на процес горіння монооксидів вуглецю по реакції $H_2O + CO \rightarrow CO_2 + H_2$ призводить до появи легкозаймистого водню. Подальше гомогенне окислення водню призводить до утворення радикалів OH і атомів H і O , що обумовлюють розвиток ланцюгів основної реакції шляхом процесів, наприклад, $(OH + CO \rightarrow CO_2 + H)$. Тому водень окислюється повністю після окиснення CO . Вода, що вводиться в реакційну зону, грає не тільки роль охолоджувача, але і хімічного реагенту, що є джерелом активних радикалів OH і H^+ , що істотно впливають на процес утворення NO і CO . Атомарний кисень, що утворюється при високих температурах, в присутності водяної пари в першу чергу реагує з H_2 і вуглецем і набагато важче з N_2 , тому концентрація атомарного кисню, який міг би брати участь в утворенні оксидів азоту, знижується.

У роботі [4] вказується, що проведення термохімічної передполум'яної підготовки вуглеводневого палива дозволяє поліпшити екологічні характеристики його згорання за рахунок конверсії вуглеводневого палива в суміш H_2 і CO , оскільки виключається термічне розкладання вуглеводнів у полум'ї з утворенням активних радикалів CH , CH_2 , що фіксують атмосферний азот. Аналіз приведених результатів розрахунків показав, що вихід оксидів азоту при температурі горіння вище 2000 К не залежить від складу палива. Зі зменшенням температури горіння вихід оксидів азоту в залежності від складу палива змінюється більш, ніж в 10 разів. При цьому необхідно підкреслити, що мінімальний вихід NO має місце при спалюванні H_2 , CO і їхньої суміші, що пояснюється дією двох конкуруючих механізмів утворення NO : термічного, що превалює при температурах вище 2000 К, і «швидкого» механізму при температурах 1800 К і менше. При цьому необхідно відмітити вплив коливального механізму «швидкого» окислення азоту у фронті полум'я. Таким чином при спалюванні H_2 і CO або їх суміші блокується термічний механізм окислювання азоту. На думку авторів, у випадку спалювання вуглеводневого палива його необхідно в процесі передполум'яних процесів перетворювати в суміш H_2 і CO при одночасному зменшенні максимальної температури і концентрації кисню в зоні горіння й забезпечення передполум'яного низькотемпературного розкладання вихідних вуглеводнів, що і відбувається при спалюванні ВПЕ.

Згідно даних [5] зниження викидів NO_x можливо за допомогою регульованого складу ($CO + H_2$). Зростання значення суми ($CO + H_2$) призводить до суттєвого зниження концентрації NO_x . При наближенні значення ($CO + H_2$) до $\sim 1,0$ об.% концентрація NO_x знижується до рівня

150 мг/м³. При зниженні концентрації (CO + H₂) до рівня ~0,02 мг/м³ концентрація NO_x зростає при спалюванні мазуту до 900 мг/м³, що відповідає рівню викидів NO_x після ДВЗ [6].

В [7] відмічається, що при пульсуючому горінні палива в продуктах згоряння отримується значно менше оксидів азоту NO_x, чим при звичайному стаціонарному горінні, внаслідок помірної температури горіння 1500...1700 К, меншого часу реагування палива з киснем, що пояснюється коливальними процесами. Важливо, що при пульсуючому горінні час $[\tau]_{NO_x}$ досягнення термодинамічно рівноважної концентрації NO_x стає ведучим фактором, тому що час τ_{NO} реагування зменшується на порядок у порівнянні зі звичайним горінням. Зниження рівня температур у камері згоряння будь-яким методом збільшує рівноважний час $[\tau]_{NO}$ реакції утворення NO. При постійному часі перебування τ_{NO} продуктів у зоні високих температур дійсна концентрація NO, що пропорційна відношенню $\tau_{NO} / [\tau]_{NO}$, буде знижуватися не тільки через зменшення рівноважної концентрації [NO], але й через зменшення величини $\tau_{NO} / [\tau]_{NO}$.

Горіння ВПЕ внаслідок мікробухів проходить під впливом значних і безперервних ангармонічних коливань, і тому переваги пульсуючого горіння відносяться і до спалювання водопаливних емульсій (ВПЕ).

Згідно даних [6] значного розвитку одержала технологія обробки газів нетермічної (холодної) плазми, що дозволяє здійснювати одночасну очистку газів від NO_x і продуктів неповного згоряння [8]. Не дивлячись на недостатність знання з кінетики процесів трансформації NO_x в холодній плазмі і неоднозначність зв'язку швидкості цих процесів з енергозатратами, в [6] представлені результати досліджень на дизелі потужністю 5 кВт, які показали, що одержаний ступінь очистки газів від NO_x від 30 до 60%. Тому цей результат дав автору змогу зробити висновок, що ця технологія являється досить перспективною.

Важливим процесом, що впливає на остаточну концентрацію NO_x на виході з камери згоряння (КЗ), є термічне (під впливом мінливої температури газів) розкладання NO_x, що вже утворилися, до ділянки КЗ, де забезпечені умови зниження температури газів. Згідно даних [5] ефективність термічного розкладання оксидів азоту, що утворилися в високофорсованих камерах згоряння, залежать від вихідних значень температури газів T_0 і концентрації оксидів азоту NO₀, швидкості охолодження газів φ і температурного діапазону зниження температури газів ΔT , в якому відбувається розкладання оксидів азоту. При термічному розкладанні оксидів азоту їх кінцева концентрація не залежить від початкової температури і визначається лише швидкістю охолодження газів φ , якій сприяють витрати теплоти на процес дисоціації.

У статті [9] приведені найкращі результати використання явища кумулятивного удару для поліпшення розпилення мазуту, оремульсії і в перспективі водовугільних суспензій в енергетичних котлах при застосуванні кавітації. При важкій кавітації полум'я оремульсії і мазуту характеризуються стабільністю горіння і сліпуче білим випромінюванням. Автори прийшли до висновків, що у цьому полум'ї відбувається дисоціація вуглеводнів і мінеральних часток з подальшим їх реагуванням і переходом продуктів реагування (по термінології авторів) в початковий стан (тобто точки зору автора, має місце процес рекомбінації, що спостерігається при плазменному режимі горіння).

У момент мікробуху в струмені викидається пароповітряної суміші з великою кількістю вільних електронів та іонів процес горіння ВПЕ починається з процесу рекомбінації атомарного водню, який володіє значними відновлювальними властивостями.

При аналізі експериментальних даних необхідно врахувати всі чинники, які впливають на вихід H₂, CO і CH₄, а також на вихід NO_x і його складових NO і NO₂, так як їх співвідношення в складі NO_x визначають не тільки рівень токсичності газів, а й рівень їх впливу на абсорбційні властивості газів і інтенсивність корозійних процесів [10]. При цьому необхідно врахувати вплив на вихід NO_x процесів, пов'язаних з проходженням плазмових процесів при спалюванні ВПЕ, підготовленого в режимі максимальної кавітаційної підготовки ВПЕ.

Процес парової газифікації вуглецю протікає відповідно до основної хімічної реакції $C + H_2O = CO + H_2$. В процесі плазменно-парової конверсії відбувається двохстадійна взаємодія вуглецю з водяною парою [3], причому при температурі від 1000°C і вище CO₂ витрачається на створення CO, а вміст CH₄ становить менше 0,1%. Крім того, суттєва перевага плазменно-парової газифікації над пароповітряною – це відсутність оксидів азоту. Застосування високоте-

мпературної водяної пари при тиску, близькому до атмосферного, обумовлено збільшенням сумарного виходу CO і H₂ при підвищенні температури процесу газифікації.

Мета роботи – порівняння показників якості горіння і концентрацій оксидів азоту при різних способах вводу води в зону горіння.

Виклад основного матеріалу. Дослідження впливу вприскування водяної пари і спалювання ВПЕ на процеси горіння, емісію NO_x, SO₂ проводилися на експериментальній установці, що забезпечує стабільність параметрів горіння, при спалюванні необводненого мазуту М40 ($S^r = 1,8\%$, $W^r = 2\%$), при вприскуванні водяної пари до кореня факела в кількості, що відповідає 30% ВПЕ, і при спалюванні водомазутної емульсії на основі цього мазуту з водовмістом W^r , рівними 15 і 30% при коефіцієнтах надлишку повітря α в межах 1,22...1,26. Всі дослідження були виконані при використанні мазуту М40 з використанням однієї проби палива при проведенні всіх досліджень, що забезпечило однаковий склад органічної частини ВПЕ і надало можливість визначення впливу способу вприску води (пари) і водовмісту ВПЕ на ефективність горіння і вихід оксидів азоту в КЗ.

Розподіл температур газів по довжині і поперечному перетину КЗ визначався за допомогою платино-родієвої термопари, корольок якої розміщувався на вході газів в зонд, що охолоджувався водою. Точність вимірювань температур – $\pm 5^\circ\text{C}$. За допомогою цього ж зонду забезпечувався ізокінетичний режим відбору газів на аналіз складу.

Контроль якості горіння мазуту, дизельного палива, ВПЕ на їх основі контролювалась за допомогою хроматографа «Газохром-3101» (вимірювання концентрації H₂, CO, CH₄, O₂ по довжині і перетину КЗ з метою визначення ефективності горіння і з метою оцінки продуктів недопалу і визначення втрати теплоти від хімічного недопалу q_3) і газоаналізатора ОКЦИ-5М з метою визначення концентрації O₂ (і відповідно коефіцієнту надлишку повітря α при горінні), а також концентрації токсичних викидів SO₂, NO_x (і окремо NO і NO₂). Порогова чутливість газоаналізаторів (в об.%) знаходиться на рівнях: $5 \cdot 10^{-4}$ по H₂, $1 \cdot 10^{-3}$ по CO і CH₄, SO₂, NO_x, $2 \cdot 10^{-2}$ по O₂. Відносна погрішність $\pm 5\%$.

Результати досліджень якості горіння ВПЕ і впливу кількості (H₂ + CO) на вихід оксидів азоту NO_x і їх складових NO₂ і NO представлені на рисунку.

При спалюванні мазуту (рис., а) отримані найменші концентрації H₂ і CO і їх суми (CO + H₂) з усіх розглянутих режимів. Причому концентрація CO мало змінюється по довжині КЗ мабуть внаслідок недостатньої кількості H₂ і H₂O, що уповільнює хід реакцій окиснення CO до CO₂, незважаючи на менше значення максимальної температури газів, що становить 1855°C, що мало б знижувати концентрацію NO_x. Мінімальний вплив відновлювальних властивостей (CO + H₂) сприяє зростанню концентрації NO_x до максимального значення 532 мг/м³. При цьому необхідно врахувати відсутність впливу чинників, що призводять до зниження викидів NO_x, які з'являються при спалюванні ВПЕ. У результаті меншої ефективності передполум'яних процесів (особливо процесів сумішоутворення) максимум температури газів T знаходиться в перетині, розташованому на 0,4 довжини КЗ. На виході з КЗ концентрації CO, CH₄, H₂ відносно високі, що призводить до зростання втрати теплоти від хімічного недожога q_3 на рівні 1%. При цьому значення відношення NO₂:NO, рівне 0,143, найменше з розглянутих режимів, що не забезпечує пасивацію поверхонь нагріву з температурою стінки t_{cm} нижче 130°C. У зв'язку з цим спостерігається зростання низькотемпературної кислотної корозії (НТК) з появою «піку» НТК на рівні 1,2 мм/рік при t_{cm} близько 110°C, що обмежує температуру відхідних газів на рівні 150...160°C [10]. Тому при спалюванні сірчистих мазутів рівень ККД допоміжних котлів знаходиться нижче 85%, а також обмежений рівень глибини утилізації теплоти газів.

При вприскуванні до кореня факела кількості водяної пари, еквівалентної 30%-ої ВПЕ (рис., б), концентрація H₂ і CO і їх сума зростає, а максимальна температура газів знижується до 1820°C. Тому під впливом цих двох чинників концентрація NO_x знижується в 1,33 рази в порівнянні з спалюванням мазуту, збільшується значення відношення NO₂:NO до 0,268. Внаслідок поліпшення процесу горіння максимум температури газів розташовується ближче до зрізу пальника. Однак у зв'язку з відсутністю впливу чинників, властивих процесу горіння ВПЕ (мікровибухи, плазмовий режим, ангармонічне акустичне поле, відновлювальні властивості атомів водню), не досягається рівень режимів спалювання ВПЕ.

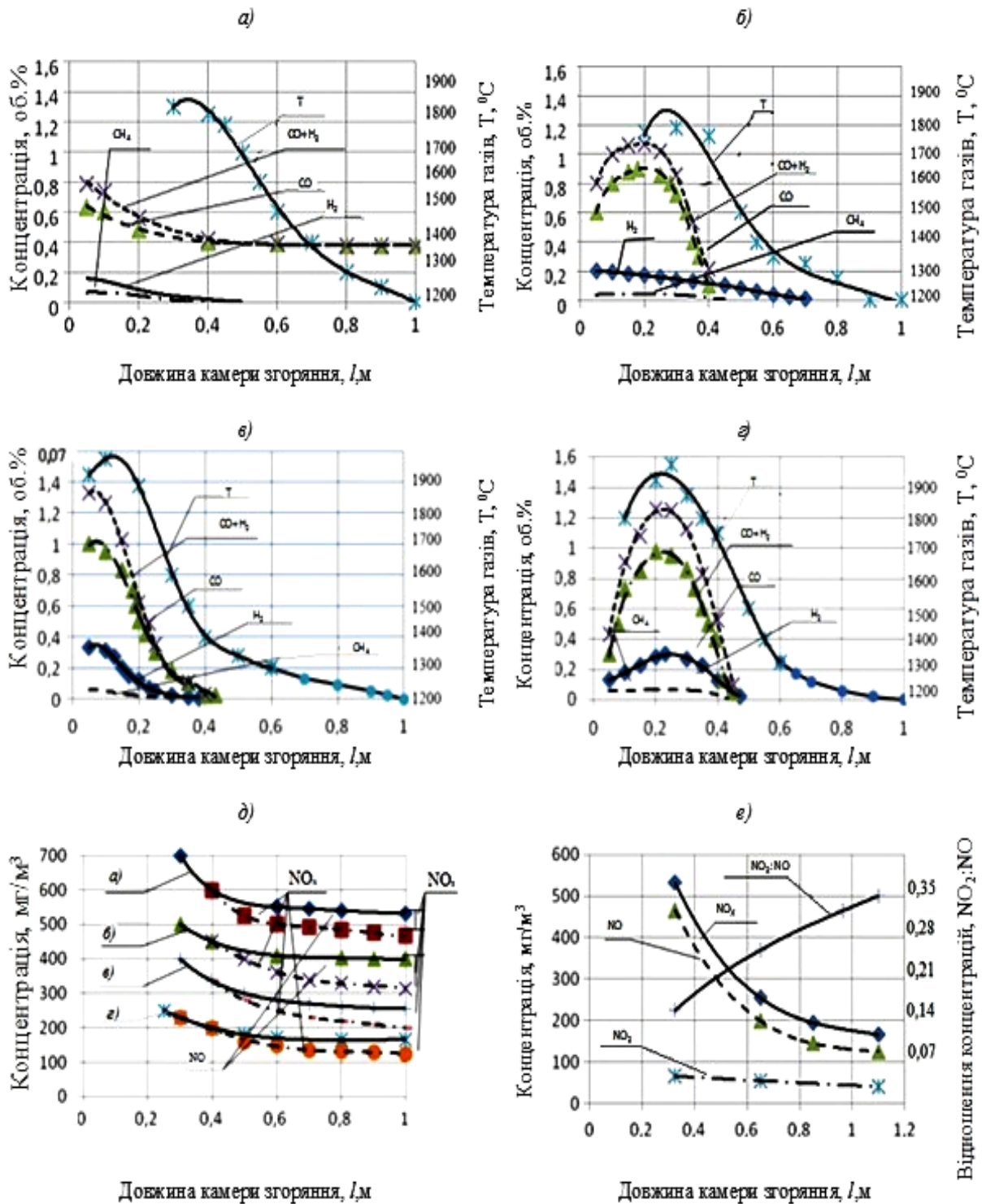


Рисунок – Результати експериментальних досліджень якості горіння по рівню концентрацій CO , H_2 , CH_4 , $(CO + H_2)$ і викидів NO_x (NO , NO_2 , $NO_2:NO$) з врахуванням розподілу температур газів T : а – при спалюванні мазуту М40 ($S^r=1,8\%$, $W^r=2,0\%$); б – при вприску водної пари в зону горіння на рівні $W^r=30\%$; в – при спалюванні ВПЕ з $W^r=15\%$; г – при спалюванні ВПЕ з $W^r=30\%$; д – розподіл концентрацій NO_x , NO , NO_2 по довжині КЗ відповідно режимам горіння (а-г); е – залежність концентрацій NO_x , NO , NO_2 і відношення $NO_2:NO$ від рівня концентрацій $(CO + H_2)$

При спалюванні ВПЕ з $W^r \approx 15\%$ (рис., в) якість горіння вище. Максимальні концентрації CO і H_2 і, отже, $(\text{CO} + \text{H}_2)$ вищі і розташовуються на найближчій відстані від зрізу пальника (~ 70 мм) з усіх розглянутих режимів внаслідок перевищення кількості теплоти, що виділяється, над витратами теплоти газів на випаровування води ВПЕ і її піроліз. Максимум температур газів знаходиться на відносній відстані 0,07 довжини КЗ і досягає 1950°C , що мало б привести до зростання концентрації NO_x . Але завдяки більшому впливу відновлювальних властивостей збільшеної суми $(\text{CO} + \text{H}_2)$ концентрація NO_x знижується. Так як при спалюванні ВПЕ створюються умови для проходження мікроривбухів її крапель і плазмового механізму горіння, то додатково починають впливати сильні відновлювальні властивості атомів водню H_1^1 , що супроводжуються реакціями рекомбінації з виділенням теплоти на рівні 400 мДж/моль і миттєвим зростанням температури до $4000\text{...}10000^\circ\text{C}$, яка потім різко знижується через витрати теплоти на ендотермічні реакції дисоціації. Потім під впливом мікроривбухів після енергійного перемішування продуктів рекомбінації з іншим потоком продуктів згорання встановлюється середня температура газів з максимальним значенням 1950°C . На цій локальній ділянці відбувається перший етап термічного розкладання NO_x зі швидкістю на рівні 10^7 К/с [5]. Після цього слід друга ділянка різкого зниження температури газів до 1600°C внаслідок високих швидкостей реакцій горіння і витрат певної кількості теплоти на реакції дисоціації CO_2 і H_2O , а також інтенсивного променистого теплообміну. Згідно з даними [5] під впливом відновлювальних властивостей $(\text{CO} + \text{H}_2)$ проходить процес термічного розкладання NO_x з меншою швидкістю на рівні $105\text{...}103$ К/с. На наступній ділянці КЗ при зниженні температури газів з 1600°C до 1200°C на виході газів з КЗ практично припиняється процес термічного розкладання NO_x .

При розгляді послідовно по ділянках довжини КЗ процесів термічного розкладання NO_x необхідно врахувати вплив ангармонічного процесу горіння ВПЕ (внаслідок проходження мікроривбухів) на встановлення відношення часу проходження реакцій до часу досягнення рівноважної концентрації NO_x , яке значно менше в зв'язку зі збільшенням швидкості реакцій під впливом акустичних ангармонічних коливань (за аналогією з процесами пульсаційного горіння), а також вплив зростання суми концентрації $(\text{CO} + \text{H}_2)$ на зв'язування N_2 повітря активними радикалами CH , CH_2 [4].

Таким чином, в зв'язку з зазначеним одночасним проходженням чотирьох механізмів (відновлювальних властивостей атомів водню H_1^1 при проходженні реакцій рекомбінації, вплив відновлювальних властивостей сумарної концентрації $(\text{CO} + \text{H}_2)$, термічного розкладання і вплив ангармонічного акустичного поля) концентрація NO_x знижується в порівнянні з розглянутими режимами до рівня 270 мг/м³, тобто в 2,0 рази в порівнянні з режимом спалювання мазути і в 1,5 рази в порівнянні з режимом введення водяної пари. Абсолютна кількість NO_2 в NO_x знижується, але відношення $\text{NO}_2:\text{NO}$ збільшується до 0,3.

При спалюванні ВПЕ з $W^r = 30\%$ (рис., г) відбувається переміщення максимуму концентрацій CO , H_2 , $(\text{CO} + \text{H}_2)$ і температури газів на відстань до 200 мм від зрізу пальника (0,2 довжини КЗ). Рівень максимальних концентрацій знаходиться практично на рівні режиму горіння з $W^r = 15\%$, але завершення реакцій горіння і створення NO_x при температурі $\sim 1600^\circ\text{C}$ закінчується на відстані практично в 2 рази більше. Внаслідок впливу чотирьох зазначених механізмів горіння ВПЕ концентрація NO_x знижується до 166 мг/м³, тобто в 1,6 рази менше в порівнянні з режимом $W^r = 15\%$. Абсолютна кількість NO_2 в NO_x знижується, а відношення $\text{NO}_2:\text{NO}$ збільшується до 0,33, що призводить до збільшення абсорбційних властивостей димових газів, збільшення концентрації NO_x в конденсаті H_2SO_4 на конденсаційних поверхнях нагріву з температурами стінки t_{cm} в межах $130\text{...}70^\circ\text{C}$, що забезпечує пасивацію поверхні вуглецевої сталі оксидами азоту і, як наслідок, істотне зниження низькотемпературної кислотної корозії до рівня $\sim 0,15\text{...}0,3$ мм/рік [10].

Зниження концентрації NO_x в порівнянні з режимом $W^r = 15\%$ пояснюється збільшенням тривалості впливу сумарної концентрації $(\text{CO} + \text{H}_2)$ на процеси утворення NO_x (до температури 1600°C) практично в 2 рази. Перепад температур газів, тривалість процесу термічного розкладання, що утворюються в процесі горіння NO_x , практично однаковий з режимом $W^r = 15\%$ (відбувається на ділянці КЗ довжиною 0,2 м тільки зміщеним на $\sim 0,2$ м від зрізу пальника). Так як дисперсність і активність ВПЕ при режимах $W^r = 15\%$ і $W^r = 30\%$ забезпечувалися практично

однаковими, то вплив рівня впливу енергії звукового поля на створення NO_x слід прийняти великим через більш високий вміст активної води в складі ВПЕ.

Порівняння впливу суми $(\text{CO} + \text{H}_2)$ по довжині КЗ при спалюванні ВПЕ з водовмістом 15 і 30% (при практично однаковій максимальній концентрації на рівні $\sim 1,2$ об.%, але різного кількісного впливу $(\text{CO} + \text{H}_2)$ по довжині КЗ, визначеній по площі під кривими $(\text{CO} + \text{H}_2)$ при $W^r = 15\%$ і $W^r = 30\%$) показало, що при водовмісті $W^r = 30\%$ вплив $(\text{CO} + \text{H}_2)$ має бути майже в 1,7 рази більше. Отже, в такій же пропорції повинна знизитися концентрація NO_x . Згідно з експериментальними даними (рис., д) концентрація NO_x при $W^r = 30\%$ становить 166 мг/м^3 , а при $W^r = 15\%$ – 270 мг/м^3 , тобто при $W^r = 30\%$ концентрація NO_x в 1,62 рази менше, що може бути пояснено більш високою відновлювальною активністю атомів водню H_1^1 і $(\text{CO} + \text{H}_2)$, більшою ефективністю термічного розкладання оксидів азоту і більшою ефективністю впливу енергії акустичного поля при $W^r = 30\%$. Так як максимальні значення температур газів (1950°C при $W^r = 15\%$ і 1940°C при $W^r = 30\%$), то мабуть акустичне поле надає більший вплив на зменшення відношення $\tau_{\text{NO}}/\tau_{\text{NO}}$, (часу реакції τ_{NO} до часу досягнення рівноважного стану $[\tau_{\text{NO}}]$).

Послідовне порівняння зазначених режимів у порівнянні зі спалюванням мазуту (рис., а) показує, що: при вприскуванні водяної пари до кореня факела (рис., б) концентрація NO_x знижується в 1,33 рази (NO знижується в 1,48 рази, а NO_2 зростає в 1,27 рази, $\text{NO}_2:\text{NO}$ зростає в 1,87 рази); при спалюванні ВПЕ з $W^r = 15\%$ (рис., в) концентрація NO_x знижується в 1,9 рази, (NO в 2,33 рази, NO_2 зростає в 1,1 рази і $\text{NO}_2:\text{NO}$ зростає в 2,1 рази); при спалюванні ВПЕ з $W^r = 30\%$ (рис., г) концентрація NO_x знижується в 3,2 рази (NO в 3,7 рази, NO_2 зростає в 1,6 рази і $\text{NO}_2:\text{NO}$ зростає в 2,3 рази).

Порівняння даних зміни концентрації NO_x і його складових NO і NO_2 по довжині l камери згоряння (рис., д) показує, що при всіх режимах спалювання (послідовно при вприскуванні водяної пари до кореня факела в кількості на рівні 30%-ої емульсії, спалювання ВПЕ з $W^r = 15\%$ і $W^r = 30\%$) спостерігається істотне зниження концентрації NO і NO_x . Важливо відзначити, що відношення $\text{NO}_2:\text{NO}$ на виході з КЗ зростає від 0,143 при спалюванні мазуту до 0,33 при спалюванні ВПЕ з $W^r = 30\%$ (так як це відношення близьке до еквімолярного, то відбувається поліпшення абсорбційних властивостей димових газів (що важливо при застосуванні скрубєрних технологій) і їх корозійних властивостей (що сприяє пасивації вуглецевих сталей внаслідок більш ефективної абсорбції оксидів азоту), що призводить до зниження інтенсивності низькотемпературної кислотної корозії [10].

Відповідно до отриманого апроксимаційного рівняння залежності $(\text{NO}_2:\text{NO})$ від суми $(\text{CO} + \text{H}_2)$ (рис., е) еквімолярне відношення $\text{NO}_2:\text{NO}$ може бути отримано при досягненні значення $(\text{CO} + \text{H}_2)$ на рівні 1,8 об.%, що цілком може бути забезпечено при підвищенні інтенсивності кавітаційно-циркуляційної підготовки ВПЕ і створенні умов для попереднього накопичення, в яку готували ВПЕ вільних електронів та іонів під впливом потужного електричного поля при використанні електродіалізного методу підготовки прісної води (ділюата) для ВПЕ, що і створить умови поліпшення інтенсифікації плазмового режиму горіння ВПЕ.

Висновки

1. Проведені експериментальні дослідження показують, що ефективність процесу горіння при спалюванні ВПЕ вища, ніж при спалюванні стандартного мазуту і при вприскуванні води або водяної пари в зону горіння.

2. Водопаливні емульсії є не просто продуктами змішання вуглеводневого палива з хімічно інертною рідиною, а зовсім особливим видом палива, яке і якісно, і кількісно змінює фізико-хімічні процеси, що характеризують горіння палива в камері згоряння і інтенсивність утворення токсичних інгредієнтів.

3. Порівняння процесів горіння рідких палив при різних способах вприскування водяної пари в зону горіння показали, що зі збільшенням кількості введеної води від 2% при спалюванні мазуту до 30% при спалюванні водопаливної емульсії з водовмістом $W^r = 30\%$ підвищується якість горіння: збільшується концентрація CO і H_2 в процесі пірогенетичних реакцій і знижується концентрація оксидів азоту.

4. Підвищення якості горіння при спалюванні емульсій пояснюється тим, що при спалюванні емульсії під дією мікровибухів її крапель збільшуються концентрації $(\text{CO} + \text{H}_2)$ і атомів

водню зі значними відновлювальними властивостями, поліпшуються умови термічного розкладання оксидів азоту і збільшується інтенсивність акустичних коливань.

Перелік використаних джерел:

1. Долматов Д.А. Химическая кинетика реакций возбужденных частиц при слабой ионизации среды / Д.А. Долматов, А.В. Кукурудза, М. Хадживанд // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2012. – № 8 (95). – С. 73-78.
2. Долматов Д.А. Генерация гидроксидов и атомарного кислорода вблизи малых плазменных включений / Д.А. Долматов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2013. – № 8 (105). – С. 167-171.
3. Мессерле В.Е. Плазменно-паровая газификация петрококка / В.Е. Мессерле, А.Б. Устименко, Л. Хан // *IV Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии: сборник научных трудов Иваново : Иванов. гос. химико-технол. ун-т*. – 2005. – С. 600-605.
4. Дубоший А.Н. Влияние состава топлива на эмиссию оксидов азота в пламени / А.Н. Дубоший, С.В. Мигалин // *Экотехнологии и ресурсосбережение*. – 1999. – № 4. – С. 73-74.
5. Росляков П.В. Влияние режимов охлаждения продуктов сгорания на термическое разложение оксидов азота / П.В. Росляков, В.А. Двойнишников, А.В. Буркова // *Теплоэнергетика*. – 1990. – № 10. – С. 35-39.
6. Новиков Л.А. Основные направления создания малотоксичных транспортных двигателей / Л.А. Новиков // *Двигателестроение*. – 2002. – № 2. – С. 13-16.
7. Терещенко М.А. Экспериментальное исследование парогенератора на основе пульсирующего горения и оценка его экологичности / М.А. Терещенко, В.И. Быченко, Н.В. Мозговой // *Теплоэнергетика*. – 2009. – № 6. – С. 69-72.
8. Van Veldhuizen E.M., Rutgers W.R., Bityurin V.A. Energy efficiency of NO removal by Pulsed corona discharges. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. – 1996. – Vol. 16. – № 2. – P.227-245.
9. Синайский Н.А. Использование метода тяжелой кавитации для сжигания мазута и оргэмульсии / Н.А. Синайский, Т.А. Гошей // *Теплоэнергетика*. – 2003. – № 6. – С. 33-37.
10. Результати досліджень низькотемпературної корозії при спалюванні водопаливних емульсій / О.В. Колбасенко, Б.В. Димо, А.В. Горячкін, В.С. Корнієнко // *Вісник Приазовського державного технічного університету*. – 2018. – Вип. 37. – С. 44-52. – (Серія : Технічні науки). – Режим доступу : [DOI: 10.31498/2225-6733.37.2018.160236](https://doi.org/10.31498/2225-6733.37.2018.160236).

References

1. Dolmatov D.A., Kukurudza A.V., Khadzhiband M. Khimicheskaya kinetika reaktsii возбужденных частиц при слабой ионизации среды [Chemical kinetic of the exciting particle reactions in the domain with low ionization]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya – Aerospace technic and technology*, 2012, no. 8 (95), pp. 73-78. (Rus.)
2. Dolmatov D.A. Generatsiya gidroksilov i atomarnogo kisloroda vblizi malykh plazmennykh vklucheni [Hydroxyl and atomic oxygen generation by small plasma inclusions]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya – Aerospace technic and technology*, 2013, no. 8 (105), pp. 167-171. (Rus.)
3. Messerle V.E., Ustimenko A.B., Khan L. Plazmenno-parovaia gazifikatsiya petrokoka. *Sbornik nauchn. trudov IV Mezhd. simpozium po teor. i prikl. plazmokhimii* [Plasma-steam gasification of petrococoke. Proceedings of IV Int. Symposium on Theoretical and Applied Plasma Chemistry]. Ivanovo, 2005, pp. 600-605. (Rus.)
4. Duboshii A.N., Migalin S.V. Vliianie sostava topliva na emissiiu oksidov azota v plameni [Influence of the fuel composition on the emission of nitrogen oxides in the flame]. *Ekotekhnologii i resursoberezhenie – Ecotechnology and resource conservation*, 1999, no. 4, pp. 73-74. (Rus.)
5. Rosliakov P.V. Dvoinishnikov V.A., Burkova A.V. Vliianie rezhimov okhlazhdeniia produktov sgoraniia na termicheskoe razlozhenie oksidov azota [Influence of cooling modes of combustion products on thermal decomposition of nitrogen oxides]. *Teploenergetika – Heat power engineering*, 1990, no. 10, pp. 35-39. (Rus.)
6. Novikov L.A. Osnovnye napravleniia sozdaniia malotoksichnykh transportnykh dvigatelei [The

- main directions of creating low-toxic transport engines]. *Dvigatelistroenie – Engine building*, 2002, no. 2, pp. 13-16. (Rus.)
7. Tereshchenko M.A., Bychenok V.I., Mozgovoi N.V. Eksperimental'noe issledovanie parogeneratora na osnove pul'siruiushchego goreniia i otsenka ego ekologichnosti [Experimental study of a steam generator based on pulsating combustion and an assessment of its environmental friendliness]. *Teploenergetika – Thermal Engineering*, 2009, no. 6, pp. 69-72. (Rus.)
 8. Van Veldhuizen E.M., Rutgers W.R., Bityurin V.A. Energy efficiency of NO removal by Pulsed corona discharges. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 1996, Vol. 16, no. 2, pp. 227-245.
 9. Sinaiskii N.A., Goshei T.A. Ispol'zovanie metoda tiazheloi kavitatsii dlia szhiganiia mazuta i orgemul'sii [Using the heavy cavitation method for burning fuel oil and orgemulsion]. *Teploenergetika – Heat power engineering*, 2003, no. 6, pp. 33-37. (Rus.)
 10. Kolbasenko O.V., Dimo B.V., Goriachkin A.V., Kornienko V.S. Rezul'tati doslidzhen' niz'kotemperaturnoi korozii pri spaliuvanni vodopalivnikh emul'sii [Results of studies of low-temperature corrosion during the combustion of water-fuel emulsions]. *Visnik Priazov'skogo Derzhavnogo Tekhnichnogo Universitetu. Seriya: Tekhnichni nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 2018, Vol. 37, pp. 44-52. **doi: 10.31498/2225-6733.37.2018.160236.** (Ukr.)

Рецензент: О.В. Щедролосєв
д-р техн. наук, проф., ХФ НУК

Стаття надійшла 03.03.2020