

UDC 632.15

**ELECTRONOCATALYTIC INTENSIFICATION COMBUSTION OF GASEOUS FUEL**

Vitalii M. Viazovyk

*Cherkasy State Technological University, blvd. Shevchenko, 460, Cherkasy, Ukraine  
Received 20 January 2023; accepted 22 February 2023; available online 25 April 2023***Abstract**

Natural gas is a highly efficient energy carrier and a valuable chemical raw material. However, gas reserves are not unlimited. Therefore, there is a need to create technologies to reduce natural gas consumption and increase the productivity of its use. For this, it was proposed to use the directed action of an artificially created low-temperature plasma with an ordered movement of "slow" electrons in the presence of a heterogeneous catalyst and to determine the optimal conditions for these processes. The use of the electron-catalytic method in the processes of combustion allows spending a significantly smaller amount of energy on the process of initiating the primary endothermic stages due to the use of the energy of "slow" electrons, the formation of which is primarily influenced by the non-equilibrium plasma. The theoretical foundations of the process of electrocatalytic intensification combustion of gaseous fuel are considered, namely the influence of elastic and non-elastic collisions, ionization, temperature inhomogeneity between the gas flow and the low-temperature plasma flow, resonance of molecular vibration frequencies and electric discharge. The dependences of the temperature change of heated water on time at different voltages of the electric discharge, the coefficient of excess air and the composition of the catalyst during the electrocatalytic combustion of gaseous fuel are given.

*Keywords: electrocatalysis; burning; intensification; gas, catalyst; dielectric barrier discharge.*

**ЕЛЕКТРОНОКАТАЛІТИЧНА ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ГОРІННЯ ГАЗОПОДІБНОГО ПАЛИВА**

Віталій М. Вязовик

*Черкаський державний технологічний університет, бул. Шевченка 460, Черкаси, Україна***Анотація**

Природний газ є високоефективним енергоносієм і цінною хімічною сировиною. Проте запаси природного газу не безмежні. Тому виникає потреба в створенні технологій по зменшенню витрат природного газу і підвищенню продуктивності його використання. Для цього було запропоновано використання направленої дії штучно створеної низькотемпературної плазми з упорядкованим рухом «повільних» електронів в присутності гетерогенного каталізатору та визначення оптимальних умов проведення цих процесів. Використання електронно-каталітичного методу в процесах горіння дозволяє витратити на процес ініціювання первинних ендотермічних стадій значно меншу кількість енергії завдяки використанню енергії «повільних» електронів, на утворення яких в першу чергу впливає нерівноважна плазма. Розглянуто теоретичні основи процесу електрокаталітичної інтенсифікації горіння газоподібного палива. Наведені залежності зміну температури води, що нагрівається від часу при різних напругах електричного розряду, коефіцієнті надлишку повітря і складу каталізатору при електрокаталітичному спалюванні газоподібного палива.

*Ключові слова: електрокаталіз; горіння; інтенсифікація; газ; каталізатор; діелектричний бар'єрний розряд.*

\*Corresponding author: e-mail address: [v.viazovyk@chdtu.edu.ua](mailto:v.viazovyk@chdtu.edu.ua)

© 2023 Oles Honchar Dnipro National University;

doi: 10.15421/jchemtech.v31i1.271226

## Вступ

Природний газ є високоефективним енергоносієм і цінною хімічною сировиною. Він має ряд переваг в порівнянні з іншими видами палива і сировини:

- вартість видобутку природного газу значно нижча, ніж інших видів палива;
- низький вміст в природних газах карбон(II) оксиду запобігає можливості отруєння людей на разі витоків газу;
- газове опалювання міст і населених пунктів значно зменшує забруднення повітряного басейну;
- робота на природному газі забезпечує можливість автоматизації процесів горіння, досягаються високі ККД;
- високі температури в процесі горіння (більше 2000° С) і питома теплота згорання дозволяють ефективно застосовувати природний газ в якості енергетичного і технологічного палива.

Запаси природного газу мають майже всі країни світу, проте найзначніші з них сконцентровані в певних частинах нашої планети. Запаси природного газу розвідані в 102 державах. Великі поклади природного газу розташовані в Росії, на Близькому Сході, в регіоні Персько-Арабської затоки, в Північній Америці, включаючи США, на Далекому Сході, в Китаї, а також в Африці – Алжирі та Нігерії. Ресурси природного горючого газу світу за різними оцінками становлять 327–546 трлн м<sup>3</sup> [1].

Проте запаси природного газу не безмежні. Тому виникає потреба в створенні технологій по зменшенню витрат природного газу і підвищенню продуктивності його використання.

Тому метою було дослідження інтенсифікації первинних ендотермічних стадій реакцій горіння сировини, що містять вуглеводневі гази, які базуються на використанні направленої дії штучно створеної низькотемпературної плазми з упорядкованим рухом «повільних» електронів в присутності гетерогенного каталізатору та визначення оптимальних умов проведення цих процесів. Вказаний процес отримав назву «електронно-каталітичний метод».

Для вирішення цієї мети поставлені наступні задачі:

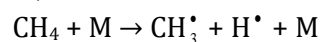
1. Створення теоретичних основ протікання електронно-каталітичної інтенсифікації горіння газоподібного палива.

2. Дослідження процесів горіння

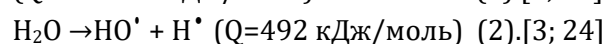
природного газу з використанням електронно-каталітичного методу.

3. Визначення оптимального складу каталізатору для проведення електронно-каталітичного спалювання природного газу.

*Теоретичні основи.* За звичайних умов первинна ініціація процесу горіння газоподібного палива і його йонізація відбуваються за реакціями (на прикладі метану і води; остання додатково споживає на своє руйнування енергію, що виділяється в процесі спалювання палива)



$$(Q = 439.58 \text{ кДж/моль}) \quad (1). [2; 21]$$



Використання електронно-каталітичного методу в процесах горіння дозволяє витратити на процес ініціювання первинних ендотермічних стадій значно меншу кількість енергії завдяки використанню енергії «повільних» електронів, на утворення яких в першу чергу впливає нерівноважна плазма. За використання низькотемпературної плазми перед зоною реакції виникають резонансні частоти коливань, які можуть вступати в резонанс з молекулою і ініціювати первинні стадії горіння. Температура електрона сягає декількох тисяч градусів без суттєвого нагріву реакційної суміші газів і дає можливість протікання хімічних реакцій за низьких температур.

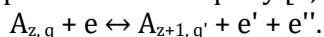
Таким чином, частково вирішується заміна термічного подолання енергії активації ендотермічних первинних реакцій, що протікають в неупорядкованому дифузійному режимі на йонно-радикальні реакції в зоні спрямованої дії низькотемпературної плазми.

В умовах електронно-каталітичного методу на хімічний процес впливають фактори: пружне і непружне зіткнення електронів і частинок, йонізація, коливальне збудження та дисоціація молекул, температурна неоднорідність між газовим потоком і потоком низькотемпературної плазми, резонанс частот коливань молекул і електричного розряду.

Пружні зіткнення частинок характеризуються: незмінною кількістю незалежних частинок, які приймають участь в процесі, незмінністю внутрішньої структури цих частинок і незмінністю усіх видів енергій частинок, які визначаються квантовими числами (енергія внутріатомних електронів, енергія коливання атомів в молекулах, енергія обертання молекул).

Непружні зіткнення електронів і

позитивних йонів можуть викликати збудження або йонізацію молекул газу, якщо їх кінетична енергія перевищує відповідне критичне значення. Кожний йонізуючий удар утворює один розсіяний і один вторинний електрон, сума енергій яких дорівнює енергії первинного електрону [4; 25]:



Одночасно відбувається йонізація молекул завдяки дисоціаційному прилипанню, яке протікає у разі зіткнення електрону з молекулою з утворенням проміжного агента розпадного стану – негативно зарядженого йону типу АВ<sup>-</sup>, який потім розкладається на фрагменти, один з яких має негативний заряд. Даний процес характеризується резонансною залежністю від енергії електрону.

В організації нерівноважних процесів і селективних реакцій велику роль відіграє коливальне збудження молекул. Для більшості електронейтральних молекул (N<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, тощо) із-за великої різниці мас електронів і молекул коливальне збудження електронним ударом відбувається в непряму зіткненні і є малоефективним. У найбільш сприятливих умовах коливальне збудження молекул в плазмі дозволяє спрямувати на проведення хімічних процесів до 80 % усієї вкладеної розрядом енергії.

Пряма дисоціація молекул в результаті зіткнень з електронами без збудження проміжними електронними станами є досить неефективною в умовах низькотемпературної плазми. Значно більший вклад може давати ступеневе збудження коливальних рівнів, яке ініційоване електронним ударом. Дисоціація призводить до зниження заселення коливальних рівнів, що викликає зменшення швидкості дисоціації в порівнянні з рівноважним значенням.

Для електричного бар'єрного розряду характерна температурна неоднорідність [5–7; 17; 18; 27]:

- середня по всій зоні розряду температура; вона включає підвищення температури газового потоку на 20–40 °С під дією стримерів;

- середня енергія електронів в мікророзряді; електрон як легка і заряджена частинка швидко набирає енергію в електричному полі;

- температура важких частинок в каналі розряду; це підвищення температури завдяки проходженню стримера; збільшення часу перебування суміші в зоні реакції приводить до нагрівання газового потоку, яке може

досягати 1000 °С і більше;

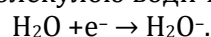
- температура, що характеризує коливальні збудження молекул в каналі; вона не має точного фізичного значення, під час її дії відбуваються значні відхилення заселених коливальних рівнів; за великого часу релаксації під дією електромагнітного поля відбувається додатковий розігрів електронів.

Багатоатомна молекула, що коливається, в кожному момент часу знаходиться в стані складного коливального руху. Кожне з коливань атомів в молекулах характеризується власною частотою (МГц): H<sub>2</sub> – 8.93, CH<sub>4</sub> – 10.05, O<sub>2</sub> – 21.3, CO<sub>2</sub> – 22.51, H<sub>2</sub>O – 11–5, N<sub>2</sub> – 3.3 [8–9; 14; 16].

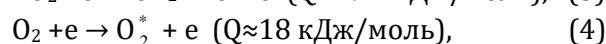
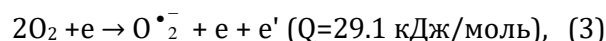
Таким чином, достатньо знайти можливість створення електричного поля з частотою, близькою до частоти коливання молекули води для створення резонансу, що і досягалося в дослідах із використанням бар'єрного розряду.

Особливістю бар'єрного розряду є те, що електрони, які утворюють даний тип розряду, проходячи скрізь шар діелектрику, уповільнюються (за що отримали назву «повільні електрони») і їх енергія складає 0.01–5 eВ за часу існування мікророзряду біля 10 нс (тобто процес миттєвий) [5–7; 17; 18; 27].

Із усіх молекул, що присутні в газовій фазі (азот, кисень, пари води, метан та інші), «повільний» електрон віддає до 80 % своєї енергії молекулам води і кисню. Проходячи крізь газову суміш, в якій присутні молекули води, такий електрон зіштовхується з молекулою води та йонізує її за реакцією:

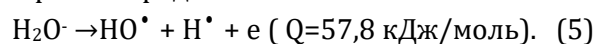


Одночасно протікають процеси з киснем. Молекули кисню під дією потоку електронів переходять у збуджений та йонізований стан. Дія на молекулу O<sub>2</sub> низькоенергетичних «повільних» електронів уможливорює реакції (3) [3; 14; 15]:

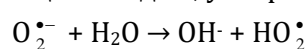


де O<sub>2</sub><sup>•-</sup> – супероксидний радикал; O<sub>2</sub><sup>\*</sup> – синглетний кисень.

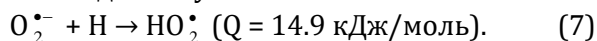
Деякі з цих йонів (H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>, H<sup>+</sup>, OH<sup>+</sup>, O<sup>+</sup>, H<sub>2</sub><sup>+</sup>, OH<sup>+</sup>, H<sup>-</sup>, O<sup>-</sup>, H<sub>2</sub>O<sup>-</sup>), наприклад, йон H<sub>2</sub>O<sup>-</sup>, дисоціює з утворенням радикалів:



Паралельно йон-радикал O<sub>2</sub><sup>•-</sup>, вступаючи в реакцію з водою, утворює радикал HO<sub>2</sub><sup>•</sup>



( $Q = 17.8$  кДж/моль), (6)  
 концентрація радикалу  $\text{HO}_2^\bullet$  збільшується з підвищенням температури і ростом кількості атомів водню в суміші:



$\text{HO}_2^\bullet$ ,  $\text{O}_2^{\bullet-}$  разом з радикалом  $\text{HO}^\bullet$  відіграють головну роль у процесах горіння і можуть використовуватися для керування ним.

У результаті реакцій (5–7; 17; 18; 27), на які витрачається значно менше енергії, ніж на термічне розкладання молекул вуглеводнів і води, утворюються радикали, які відіграють суттєву роль в ініціюванні і підготовці реакційної суміші для процесу окиснення [3; 21–23].

У газовій суміші в передпалум'яній зоні значно зменшується вміст води, на руйнування молекул якої витрачається велика кількість енергії. Замість неї утворюються радикали та йони, теплоємність яких значно менша теплоємності води і завжди має негативне значення.

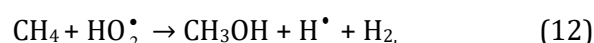
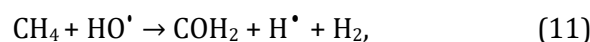
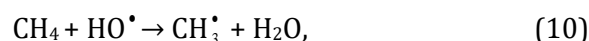
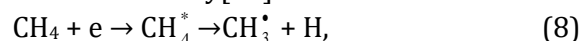
Кожний йон, який утворюється, має досить високі значення енергії споріднення як до електрону, так і до протону. Енергія споріднення до електрону для молекули води складає  $-5$  еВ ( $-482$  кДж/моль)[19–20], тобто молекула води повністю поглинає енергію електрону, утворюючи велику кількість йонів та вторинних електронів, значення енергій споріднення яких до електрону або протону мають свої величини, і в деяких випадках досить високі. Усі ці йони та вторинні електрони продовжують ланцюг ініціювання будь-якого процесу (в нашому випадку – процесів електронно-каталітичного горіння). Загальна кількість енергії, що виділяється, може досягати високого значення (до 55 еВ) [19–20] і вносити суттєвий вклад в енергетику процесу, коли на створення самого електричного розряду необхідно лише 1.2 кДж/моль енергії [8–9].

Великий енергетичний вклад для описаних сполук вносить диссоціативне прилипання та електронне збудження. Так, Русановим В.Д. [10] було встановлено, що енергетична ефективність диссоціативного прилипання для руйнування молекули води найбільша за вкладання енергії на одну молекулу не більше 0.5 еВ, і вірогідність може досягати 55 %. За збільшення цієї енергії до 2–2.5 еВ починає переважати процес коливального збудження (вірогідність 60 %), який є більш складним і енергоємним процесом руйнування води.

А оскільки дія електронно-каталітичного

методу в паливно-повітряній суміші різко зменшує кількість води, то ця енергія може додаватися до сумарної енергії, що надають електрони і протони. Утворюється велика кількість негативно та позитивно заряджених частинок, а також радикалів. Усі ці сполуки під час утворення виділяють велику кількість енергії. Сумарний енергетичний вклад вуглеводневих сполук достатній, щоб ініціювати процес горіння. Для газової фази в ході досліджень досягався додатковий середній енергетичний ефект в розмірі 12–15 % від кількості енергії, що виділялася за звичайного згорання палива.

Під дією первинних та вторинних електронів та радикалів, які утворилися під час руйнування молекул води, ініціюється окиснення метану[26]:



Радикал  $\text{CH}_3^\bullet$ , який утворився в значно більшій кількості ніж при звичайному горінні, вступає в реакцію за звичайною схемою горіння за реакціями, енергії активації яких близькі до нуля.

У результаті руйнування молекул води, підвищується вихід радикалів  $\text{HO}^\bullet$ ,  $\text{HO}_2^\bullet$ ,  $\text{RO}^\bullet$ ,  $\text{RO}_2^\bullet$ , які є ініціаторами запалення. Завдяки цим радикалам зменшується реальна потреба в кисні, збільшується ступінь вигорання палива і знижується утворення оксидів нітрогену (II) і карбону (II), що підтверджується результатами досліджень.

За використання електронно-каталітичного методу для ініціації первинної стадії окиснення в зоні електричного розряду електрон надає ту кількість енергії, яка необхідна для ініціації процесу горіння. В ідеальному випадку, завдяки відсутності витрат енергії на руйнування молекул води, кількість теплоти, що виділяється в процесі спалюванні 1 моля метану, повинна складати не 891.88 кДж/моль, а  $891.88 + 439.58 = 1331.46$  кДж/моль, тобто на 33 % більше.

Накладання електричного розряду на полум'я під дією електромагнітного поля і потоку електронів приводить до спрямованого руху позитивних часток, які утворюються в полум'ї. Під дією електронів кількість цих

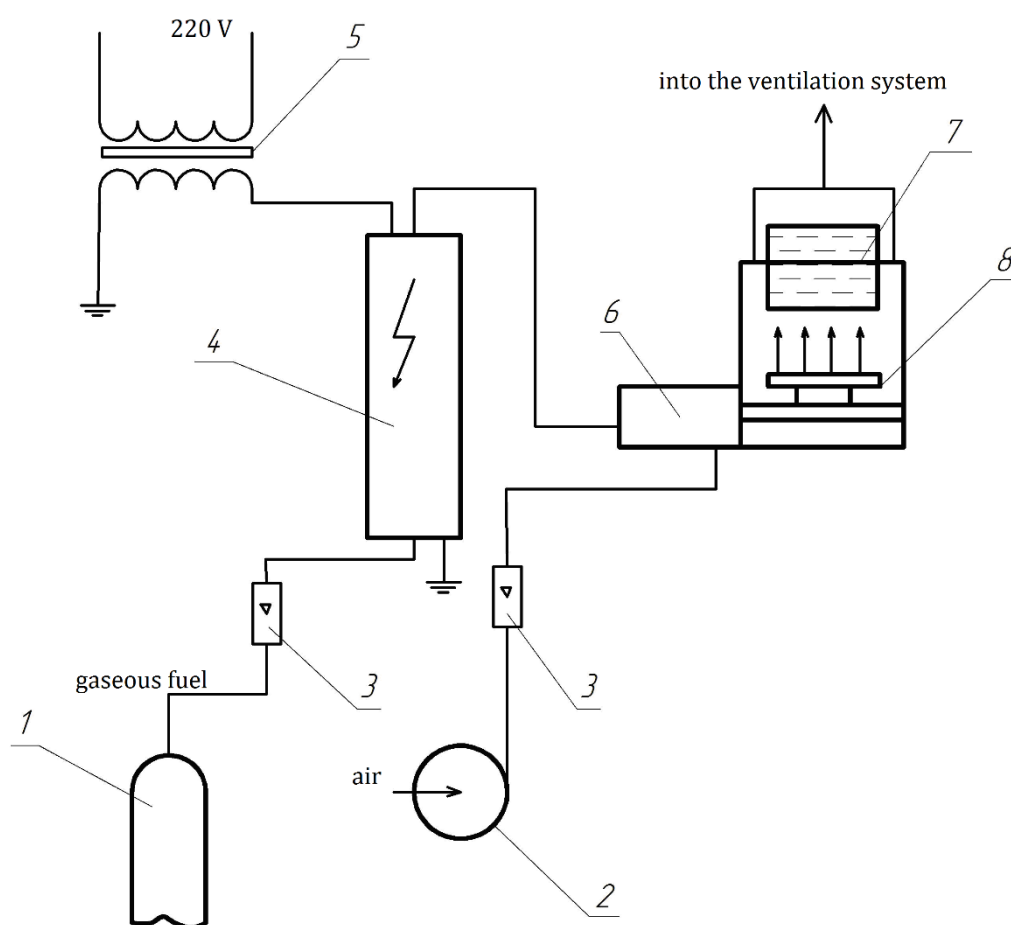
йонів збільшується. Дія цього спрямованого руху йонізованих частинок збільшує швидкість процесу горіння завдяки більш інтенсивному руху частинок та зміні поверхні контакту. Відзначена зміна форми полум'я з трикутної на трапецевидну.

Усе це дозволяє зменшити час обробки електронами палива та інтенсифікувати первинні стадії хімічного процесу.

*Опис методики дослідження.* Бар'єрний розряд створювали в спеціально сконструйованому генераторі радикалів, що складається з двох частин – електродів, розташованих на невеликій відстані один від одного. Конструктивно електроди виконані у вигляді двох коаксіально розташованих

циліндрів, які приєднані до джерела змінного струму високої напруги. У зв'язку з необхідністю подачі в зону розряду парів води вибрано ефективний матеріал діелектрика, який має довготривалу стійкість до впливу парів води в розряді. Розрядний об'єм генератора радикалів становив 25 см<sup>3</sup>.

Дослідження процесу інтенсифікації горіння газоподібного палива в зоні тихого розряду проводили на лабораторній установці (рис. 1), яка складалася з балону, генератора радикалів, змішувача і пальника. Для запобігання горінню палива в самому каталізаторі подача повітря здійснювалась над каталізатором. Через каталізатор пропускали тільки газоподібне паливо.



**Fig. 1. Scheme of the experimental installation for electronic-catalytic intensification of the gaseous fuel combustion process. 1 - cylinder with gaseous fuel; 2 - compressor; 3- rotameter; 4 - radical generator; 5- power source; 6 - mixer; 7 - we heat the body; 8 - burner.**

**Рис. 1. Схема дослідної установки електронно-каталітичної інтенсифікації процесу горіння газоподібного палива. 1 - балон з газоподібним паливом; 2 - компресор; 3- ротаметр; 4 - генератору радикалів; 5 - джерело живлення; 6 - змішувач; 7 - тіло, що нагрівається; 8 - пальник.**

Експерименти проводили як з сухим газоподібним паливом, так і з додаванням різних присадок. В якості добавок використовували пари води, CO<sub>2</sub> – індивідуально і в поєднанні. Вимірювали час нагріву певного об'єму води від початкової

температури (11.5–20.5 °С) до 98 °С. Об'єми води складали 50 чи 100 см<sup>3</sup>, напруга в генераторі радикалів змінювалася від 5 до 11 кВ. Кожне вимірювання повторювали з різницею не більше 3–4 хвилин мінімум 3 рази до відтвореного результату. Витрати

газоподібного палива становили 150, 200, 300 та 400 см<sup>3</sup> (час перебування в зоні розряду – 0.036, 0.027, 0.018, 0.014 с).

### Результати досліджень та їх обговорення

Для досягнення найбільшого ефекту з інтенсифікації процесу горіння газоподібного палива були проведені дослідження як з чистим газоподібним паливом, так і в присутності різноманітних сполук.

(вуглекислий газ, пари води та їх комбінації). Результати цих досліджень представлені в табл. 1.

Як видно з табл. 1, найбільша економія досягається за використання чистого газоподібного палива в присутності домішок парів води. Економія палива досягає 14.6 % за напруги 6 кВ за рахунок утворення великої кількості кисневмісних радикалів.

Table 1

#### Electro-catalytic combustion of gaseous fuel [11-13]

Таблиця 1

#### Електронно-каталітичне горіння газоподібного палива [11-13]

Conditions	Initial water temperature, °C	Volume water, sm <sup>3</sup>	Water heating time, sek	Processing voltage, kV						
				5	6	7	8	9	10	11
				Time, sec	Time, sec	Time, sec	Time, sec	Time, sec	Time, sec	Time, sec
without H <sub>2</sub> O τ=0,018	20,5	100	433	405	370	385	390	381	424	376
with H <sub>2</sub> O τ=0,018	19,5	100	400	361	381	400	385	390	360	379
with CO <sub>2</sub> τ=0,018	20	100	490	444	425	451	443	434	441	447
CO <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> Oτ=0,018	18,5	100	285	-	290	295	320	319	-	-
with H <sub>2</sub> Oτ=0,014	11,5	50	172	-	162	161	163	171	169	-
with H <sub>2</sub> Oτ=0,027	11,5	50	216	-	200	192	203	216	216	-
with H <sub>2</sub> Oτ=0,036	15	50	286	-	334	256	237	235	-	-

Note: τ is the gas fuel processing time in seconds

За додавання до палива вуглекислого газу досягається значно більша економія палива, але вона не досягає значень для спалювання чистого газоподібного палива. Економія палива досягає 13.3 % за напруги 6 кВ. Одночасне додавання до палива парів води і вуглекислого газу (моделювання додавання димових газів) не дає економії палива, а навпаки, збільшує витрати пального. Усе сказане пояснюється тим, що додавання до палива домішок ініціює протікання різноманітних побічних реакцій, які зменшують вихід радикалу CH<sub>3</sub><sup>\*</sup>, що, в свою чергу, зменшує ефект від інтенсифікації процесу горіння.

Також на інтенсифікацію процесу горіння впливає час перебування в зоні розряду. Як видно з табл. 1, оптимальний час перебування в зоні розряду становить 0.018 с. За підвищення часу перебування в зоні розряду більше 0.018 с зменшується ефект від інтенсифікації горіння, а час перебування в зоні розряду 0.036 с знижує ефект за рахунок ініціювання реакцій руйнування вуглеводнів. За зменшення часу перебування в зоні розряду

менше 0.018 с ефект зменшується, а також зменшується вплив напруги на ефект за рахунок того, що паливо за весь час перебування в зоні розряду не встигає повністю отримати необхідну енергію для протікання реакції ініціювання процесу горіння [11-13].

Споживана потужність для наведених дослідів в середньому складає 0.015 Вт·год для 1 дм<sup>3</sup> палива

Також були проведені дослідження з використанням різних каталізаторів. Для досліджень були використані каталізатори складу: КТ1, який має склад Ni – 5 %, α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 1 % промотер, λ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 94 %; КТ2: Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 92.5 %, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 7.3 %, SO<sub>3</sub> – 0.2 %; КТ3: Cr – 18 %, Ni – 10 %, Ti – 1 %, інше залізо. З метою моделювання корозії металу в котлоагрегаті використана іржа сталі Ст3 (за стандартом ASTM (USA) –A568M), яка містить в великій кількості Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>.

Результати досліджень представлені на рис. 2 для різних коефіцієнтів надлишку повітря і часів обробки.

Як видно з рис. 2, найбільша різниця

температур між контрольним дослідом і дослідом з обробкою, досягається:

- за використання каталізатору КТ3 досягається найбільша різниця температур за

усіх напруг і коефіцієнтів надлишку повітря, а також часу обробки. Інші каталізатори мають менше зростання температури.

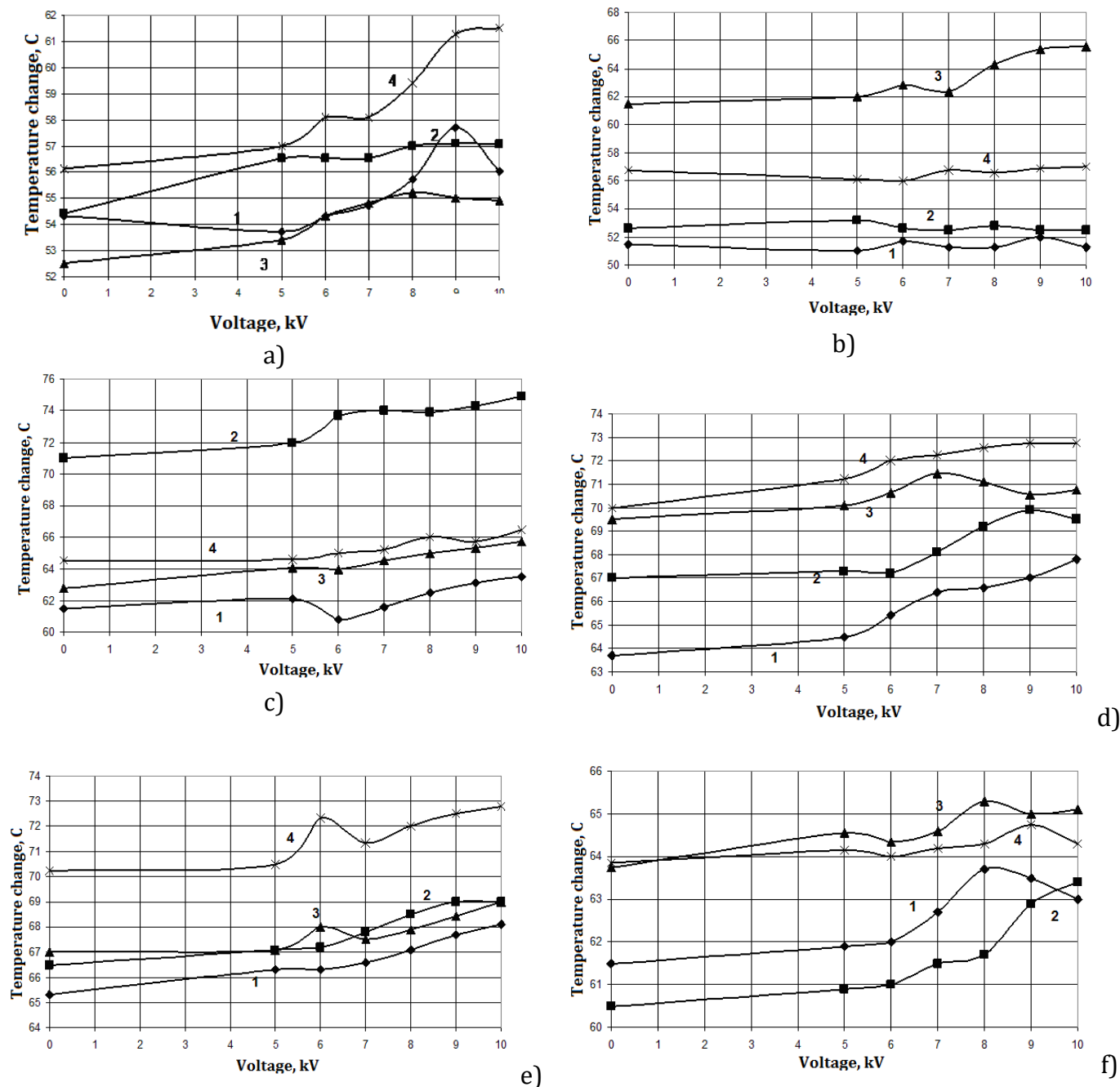


Fig. 2. Dependence of the water temperature change on the voltage with the excess air coefficient  $\alpha$  and processing time  $\tau$ : a -  $\alpha=0,68$  і  $\tau=0,027$  c; b -  $\alpha=1,1$  і  $\tau=0,027$  c; c -  $\alpha=1,25$  і  $\tau=0,018$  c; d -  $\alpha=1,3$  і  $\tau=0,014$  c; e -  $\alpha=1,383$  і  $\tau=0,014$  c; f -  $\alpha=1,563$  і  $\tau=0,014$  c.

1 - rust of ST3 steel; 2 - KT2; 3- KT3; 4 - KT1

Рис. 2. Залежність зміни температури води від напруги при коефіцієнті надлишку повітря  $\alpha$  і часі обробки  $\tau$ : а -  $\alpha = 0.68$  і  $\tau=0.027$  c; б -  $\alpha = 1.1$  і  $\tau=0.027$  c; в -  $\alpha=1.25$  і  $\tau = 0.018$  c; д -  $\alpha = 1.3$  і  $\tau=0.014$  c; е -  $\alpha = 1.383$  і  $\tau = 0.014$  c; ф -  $\alpha = 1.563$  і  $\tau=0.014$  c

1 - іржа сталі СТ3; 2 - КТ2; 3- КТ3; 4 - КТ1

Так, за використання каталізатору КТ1 в ряді випадків спостерігається значно більше зростання температури, ніж за використання КТ1. Це пояснюється каталітичною дією нікеля, що присутній в обох каталізаторах і є

каталізатором дегідрування, а в КТ3 присутній також хром, який також є каталізатором дегідрування. Найменше збільшення температури спостерігалось за використання в якості каталізатору іржі сталі Ст3 з високим

вмістом  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , що зменшує ефект від використання електронного каталізу.

- найбільше зростання температури спостерігається за часу контакту 0.018 с, з коефіцієнтом надлишку повітря в межах 0.84–1.1 і в присутності каталізаторів, які містять нікель, і складає 3–4 градуси в порівнянні з контрольним дослідом. За менших значень коефіцієнт надлишку також менший і не перевищує 3 градусів в порівнянні з контрольним дослідом. Для коефіцієнтів надлишку повітря більше 1.1 ефект збільшення температури зменшується і не перевищує 2 градусів. Також збільшення коефіцієнту надлишку повітря дозволяє використовувати каталізатори з високим вмістом  $\text{Fe}_2\text{O}_4$ . Так, за коефіцієнту надлишку повітря більше 1.25 у присутності каталізатору складу:  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 92.5 %,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  – 7.3 %,  $\text{SO}_3$  – 0.2 % збільшення температури в порівнянні з контрольним дослідом досягає 3 градусів [11–13].

Споживана потужність для наведених дослідів в середньому складає 0.015 Вт·год для 1  $\text{дм}^3$  палива, що не перевищують 2.7 % від кількості тепла, що утворилася додатково.

### Висновки

У процесі електронного каталіза на хімічний процес впливають фактори: не пружне і пружне зіткнення електронів і частинок, йонізація, коливальне збудження та дисоціація молекул, температурна неоднорідність між газовим потоком і потоком низькотемпературної плазми, резонанс коливальних молекул і електричного розряду.

Було досліджено вплив різних видів розрядів та каталізаторів на процес

електронно-каталітичного спалювання газоподібного палива.

При додаванні до палива водяної пари спостерігається значне зменшення виділення тепла і досягає лише 5.2 % за тієї же напруги. Таким чином досягається значно більша економія палива, але вона не досягає тих значень, що дає спалювання чистого газоподібного палива. Найбільша економія палива досягає 13.3 % за напруги 6 кВ. При одночасному додаванні до палива парів води і вуглекислого газу немає економії палива, а навпаки, збільшуються витрати пального.

Максимальне збільшення температури спостерігається за часу контакту 0.018 с і коефіцієнту надлишку повітря в межах 0.84–1.1 і в присутності каталізаторів, які містять нікель, складає 3–4 градуси в порівнянні з контрольним дослідом. За менших значень коефіцієнту надлишку – і не перевищує 3 градусів в порівнянні з контрольним дослідом. За коефіцієнтів надлишку повітря більше 1.1 ефект зростання температури зменшується і не перевищує 2 градусів.

Дослідження впливу різних каталізаторів визначило:

- за використання каталізатору КТ3 досягається найбільша різниця температур за усіх напруг і коефіцієнтів надлишку повітря і часу обробки. Інші каталізатори мають менше збільшення температури. За використання каталізатору КТ1 в ряді випадків спостерігається значно більше зростання температури, ніж за використання КТ3;

- спожита потужність для наведених дослідів не перевищує 2.7 % від кількості тепла, що утворилася додатково.

### References

- [1] Biletsky, V. S., Rozumny, P. V. (2015). World resources and reserves of natural gas. *Collection of scientific works of FNGtP*, 7, 106–117.
- [2] Arutyunov, B.C., Krylov, O.V. (1998). [Oxidative transformations of methane]. Moscow, Russian Federation: Nauka (in Russian)
- [3] Itikawa, Y., Mason, N. (2005) Cross Sections for Electron Collisions with Water Molecules. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 34. (1), 1–22.
- [4] Hrabrov, V. A. (1983). [Physical and chemical processes in plasma chemical reactors]. Moscow, Russian Federation: Izd. MYTHS. (in Russian)
- [5] Avtaeva, S.V. (2009). [Barrier discharge. research and application]. Bishkek, Kyrgyzstan: Izd-vo KRSU (in Russian)
- [6] Kogelschatz, U. (2003). Dielectric-barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 23(1), 1–46
- [7] Lim, M. T., Zulazlan, Shah Zulkifli, A. Z., Jayapalan, K. K., Chin, O. (2017). Development of a dimensionless parameter for characterization of dielectric barrier discharge devices with respect to geometrical features. *Plasma Sci. Technol.*, 19(9), 095402
- [8] Syvin, S. (1971). [Oscillations of molecules and mean square amplitudes]. Moscow, Russian Federation: Mir (in Russian)
- [9] Hertzberg, H. (1974). [Spectra and structure of simple free radicals]. Moscow, Russian Federation: Mir (in Russian)
- [10] Rusanov, V. D., Friedman, A. A., Sholin, G. V. (1981) Physics of chemically active plasma with non-equilibrium oscillatory excitation of molecules. *Successes of physical sciences*, 134(2), 185–35 (in Russian)



- [11] Viazovyk, V. (2020). Electrocatalytic intensification of burning processes for hard and gaseous fuel. 3 *International scientific and technical conference «Innovative development of resource-saving technologies and sustainable use of natural resources»*, Petrosani, Romania October, 26, 33–35.
- [12] Viazovyk, V. (2011). [Optimization of process of burning of gaseous fuel]. *I International Scientific and Practical Conference "Advanced Development of Science and Technology"*, Przemysl, Polska. 2011, 97–99. (in Ukrainian)
- [13] Stolyarenko, H.S., Viazovyk, V.M., Vodyanyk, O.V. (2010). Electrocatalytic intensification of gaseous fuel combustion. *Bulletin of the National Technical University, Kharkiv Polytechnic Institute*, 13, 112–120 (in Russian)
- [14] Briegleb, G. (1964). Electron Affinity of Organic Molecules. *Angewandte Chemie International Edition* 3(9), 617–632
- [15] Amati, M., Stoia, S., Baerends, E. J. (2020) The Electron Affinity as the Highest Occupied Anion Orbital Energy with a Sufficiently Accurate Approximation of the Exact Kohn–Sham Potential. *J. Chem. Theory Comput.* 16(1), 443–452 <https://doi.org/10.1021/acs.jctc.9b00981>
- [16] Li, J, Duchemin, I, Roscioni, O. M., Friederich, P., Anderson, M., Como E. D., -Köhn, G. K., Wenzel, W., Zannoni, C., Beljonne, D., Blase, X., D'Avino, G. (2019). Host dependence of the electron affinity of molecular dopants. *Mater. Horiz.*, 6, 107–114. <https://doi.org/10.1039/c8mh00921j>
- [17] He, J, Wen, X., Wu, L., Chen, H. (2022). Dielectric barrier discharge plasma for nanomaterials: Fabrication, modification and analytical applications. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 156, November, 116715. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2022.116715>
- [18] Li J, Ma, C., Zhu, S., Yu, F., Dai, B., Yang, D. (2019). A Review of Recent Advances of Dielectric Barrier Discharge Plasma in Catalysis. *Nanomaterials*, 9, 1428 <https://doi.org/10.3390/nano9101428>
- [19] Gorfinkiel, J., Morgan, L.A., Tennyson, J. (2002). Electron impact dissociative excitation of water within the adiabatic nuclei approximation. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 35 543-555. <https://doi.org/10.1088/0953-4075/35/3/309>
- [20] Gorfinkiel, J.D. (2020). Electron collisions with molecules and molecular clusters. *The European physical journal D*, 7451. <https://doi.org/10.1140/epjd/e2020-100550-7>
- [21] Varghese, R. J., Kolekar, H.I, Kishore, V. R., Kumar, S. (2019). Measurement of laminar burning velocities of methane-air mixtures simultaneously at elevated pressures and elevated temperatures. *Fuel*, 257(1) 116120. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116120>
- [22] Han, X., Wang, Z., Wang, S., Whiddon, R., He, Y., Lu, Yu, Konnov, A. A. (2019) Parametrization of the temperature dependence of laminar burning velocity for methane and ethane flames. *Fuel*, 239(1),1028–1037 <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.11.118>
- [23] Han, X., Wang, Z., He, Y., Wang, S, Zhu, Y., Konnov, A.A. (2019). Over-rich combustion of CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, and C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> +air premixed flames investigated by the heat flux method and kinetic modelling. *Combustion and Flame*, 210, 339–349. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.09.009>
- [24] Jia, Z., Yang, N., Sun, L., Zhao, Y., Li W., Luan, J, Lyu, F., Zhang, L.C, Kruzic, J.J., Kai, J.J, Huang, J.C., Lu J, Liu, C.T., Novel, A. (2020). Multinary Intermetallic as an Active Electrocatalyst for Hydrogen Evolution *Advanced Materials*, 2000385. <https://doi.org/10.1002/adma.202000385>
- [25] Bogaerts, A., Zhang, Q.Z., Zhang, Y.R., Laer, K.V., Wang, W. (2019). Burning questions of plasma catalysis: Answers by modelling. *Catalysis Today*, 337, 15, 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2019.04.077>
- [26] Uytendhouwen, Y., Bal, K.M., Neyts, E.C., Meynen, V., Cool, P., Bogaerts, A. (2021) On the kinetics and equilibria of plasma-based dry reforming of methane. *Chemical Engineering Journal*, 405(1), 126630. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126630>
- [27] Uytendhouwen, Y., Hereijgers, J., Breugelmans, T., Cool, P., Bogaerts, A. (2021) How gas flow design can influence the performance of a DBD plasma reactor for dry reforming of methane *Chemical Engineering Journal*, 405(1), February 126618 <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126618>