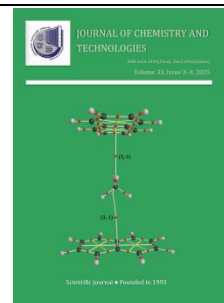




Journal of Chemistry and Technologies

pISSN 2663-2934 (Print), ISSN 2663-2942 (Online).

journal homepage: <http://chemistry.dnu.dp.ua>
 editorial e-mail: chem.dnu@gmail.com



UDC 632.15

INFLUENCE OF HIGH-FREQUENCY DISCHARGE ON ELECTRO-CATALYTIC COMBUSTION OF GASEOUS FUEL

Vitalii M. Viazovyyk

Cherkasy State Technological University, blvd. Shevchenko, 460, Cherkasy, Ukraine

Received 2025; accepted 2025; available online 20 October 2025

Abstract

Natural gas is a highly efficient energy carrier and a valuable chemical raw material. Therefore, to reduce the consumption of natural gas and increase the productivity of its use, it was proposed to use an artificially created low-temperature plasma with an ordered movement of "slow" electrons in the presence of a heterogeneous catalyst and high-frequency current. The theoretical foundations of the combustion process of gaseous fuel and the use of high-frequency current in the creation of low-temperature plasma are considered. The dependences of the change in the temperature of heated water on time at different voltages, frequencies and sinusoidal shapes of the electric discharge current during the electro-catalytic combustion of gaseous fuel are given. The energy characteristics of the process under study are determined. When using electronic catalytic combustion of natural gas with a high-frequency discharge, the optimal parameters are a discharge voltage of 2.5–3 kV, a frequency of 2.4 kHz, and a total sinusoidal shape.

Keywords: electro-catalysis; combustion; intensification; catalyst; dielectric barrier discharge; high-frequency current.

ВПЛИВ ВИСОКОЧАСТОТНОГО РОЗРЯДУ НА ЕЛЕКТРОННО-КАТАЛІТИЧНЕ СПАЛЮВАННЯ ГАЗОПОДІБНОГО ПАЛИВА

Віталій М. Вязовик

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

Анотація

Природний газ є високоефективним енергоносієм і цінною хімічною сировиною. Тому для зменшення витрат природного газу і підвищення продуктивності його використання було запропоновано використання штучно створеної низькотемпературної плазми з упорядкованим рухом «повільних» електронів у присутності гетерогенного каталізатору і високочастотного струму. Розглянуто теоретичні основи процесу горіння газоподібного палива та використання високочастотного струму під час створення низькотемпературної плазми. Наведені залежності зміни температури води, що нагрівається, від часу за різних напруг, частот і формах синусоїди струму електричного розряду, під час електронно-каталітичного спалювання газоподібного палива. Визначені енергетичні характеристики проведення процесу, що досліджується. Для використання електронно-каталітичного горіння природного газу з високочастотним розрядом оптимальними параметрами є напруга розряду 2.5–3 кВ, частота 2.4 кГц і сумарна форма синусоїди.

Ключові слова: електронно-каталіз; горіння; інтенсифікація; каталізатор; діелектричний бар'єрний розряд, високочастотний струм.

*Corresponding author: e-mail: v.viazovyyk@chdtu.edu.ua

© 2025 Oles Honchar Dnipro National University;

doi: 10.15421/jchemtech.v33i3.321615

Вступ

Природний газ, незважаючи на сучасний стан розвитку промисловості, є найпоширенішим і екологічно чистим видом палива. Потреби в ньому ростуть з кожним роком. Згідно зі статистичними прогнозами [1; 2] до 2050 року потреби в ньому за сучасного рівня промисловості зростуть до 25 %. Зростання споживання газу характерно для країн, економіка яких розвивається (крім Китаю). В цих країнах попит на природний газ до 2050 року може збільшитися на 50 %. Зростання світового попиту на газ також посилюється через збільшення споживання в Китаї, знову значною мірою завдяки зростанню використання в межах індустріально-енергетичного сектору. Збільшення китайського попиту на газ до 2050 року збільшиться приблизно на третину в порівнянні з 2022 роком. Міжнародне енергетичне агентство прогнозувало на кінець 2024 року світове споживання «блакитного» палива в 2025 році на рівні 4.293 трлн куб. м [3]. Враховуючи запаси і рівень споживання існуючих родовищ, вистачить приблизно на 52.3 роки [4].

Основні поклади природного газу знаходяться в Росії (24.3 %). Ірані (17.3 %), Катарі (12.5 %), США (5.3 %), Саудівській Аравії (4.2 %), Туркменістані (3.6 %). Україна займає 23 місце в списку по покладам природного газу, і її доля від загального світового рівня складає 0.6 % [4].

Природний газ є вельми цінною сировиною, і використання його в якості палива є небажаним. Але сучасний рівень енергетики поки що не може відмовитися від такого екологічно чистого і дешевого виду палива як природний газ. Тому і стає питання про розробки технологій по зменшенню витрат природного газу під час спалювання та збереження, а по можливості й збільшенню кількості тепла, яке можна отримати.

Тому метою було дослідження інтенсифікації реакції електронно-каталітичного горіння природного газу, яка базується на використанні спрямованої дії штучно створеної низькотемпературної плазми з упорядкованим рухом «повільних» електронів у присутності гетерогенного каталізатору й високочастотного струму та визначення оптимальних умов проведення цих процесів. Такий процес отримав назву електронно-каталітичний метод.

Теоретичні основи

Під час окиснення газоподібних вуглеводнів можливо виділити три температурних режими, які значно відрізняються за механізмом процесів, що протікають.

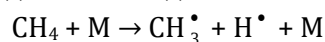
Низькотемпературний режим (температура $\leq 160^\circ\text{C}$) можливо охарактеризувати як режим хімічного синтезу. В цій температурній області основними первинними продуктами окиснення є кисеньовмісні органічні молекули, в тому числі гідропероксидного типу RCH_2OOH і R_2CHOOH

Окиснення в цій області протікає лише в присутності каталізатору чи ініціатору. Оскільки гідроперокси нестійкі за температур вище 100°C , вони мають тенденції до автокаталітичного ланцюгового розпаду з утворенням здебільшого спиртів і кетонів (чи альдегідів) [5–7].

Середній температурний режим, ($250\text{--}450^\circ\text{C}$), який також називається областю «холодного» полум'я і який характеризується утворенням олефінів і гідроперооксиду. Найбільш характерною рисою окиснення вуглеводнів у цьому режимі є автокаталіз процесу. Реакція починається дуже повільно, збільшуючи свою швидкість протягом періоду індукції до досягнення максимального значення, за яким спостерігається спад, пов'язаний зі зменшенням концентрації вуглеводню. Інша характерна особливість окиснення вуглеводнів у цьому температурному інтервалі – поява люмінесценції, а також свічення в блакитній області спектру, за що й отримало назву «холодного» полум'я.

Режим горіння. За температур, вищих за 450°C відбувається гаряче займання вуглеводнів. Період індукції практично відсутній чи дуже короткий. Повне окиснення вуглеводнів супроводжується більшим виділенням енергії.

За звичайних умов первинна ініціація процесу горіння газоподібного палива і його йонізація відбуваються за реакціями (на прикладі метану і води, яка додатково споживає на своє руйнування енергію, що виділяється під час спалювання палива):



$$(Q = 439.58 \text{ кДж/моль}). \quad (1)$$

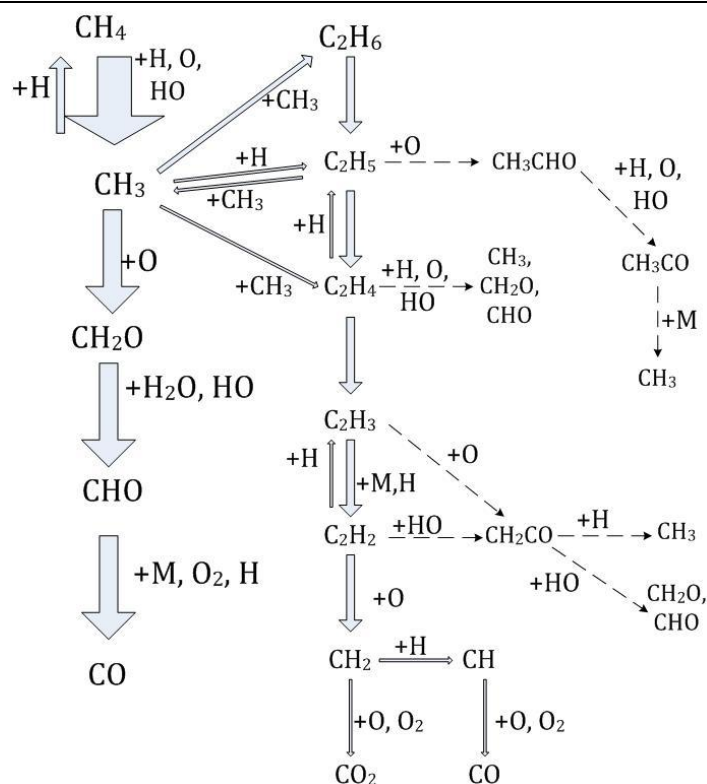


Fig. 1. Methane combustion diagram [5-6]

Рис. 1. Схема горіння метану [5-6]

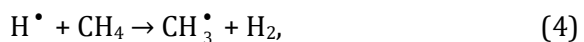
$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HO}^\bullet + \text{H}^\bullet$ ($Q = 492$ кДж/моль) [5-8]

(2). Найбільш детально окиснення метану вивчено за 673–873 К. Воно протікає через проміжне утворення вільних радикалів $\text{CH}_3^\bullet$, $\text{CH}_3\text{O}^\bullet$, $\text{HO}_2^\bullet$, $\text{HCO}^\bullet$ і молекулярних часток H_2O_2 і CH_3OOH . Найдетальніше механізм горіння метану представлено в працях Варнатц Ю. (рис. 1) [5-6].

Первинним радикалом, що утворюється в системі, є радикал $\text{CH}_3^\bullet$ за реакцією:



Енергія активації даної реакції 439.58 кДж/моль. Ініціюючу дію чинять домішки вуглеводнів, а також кисень. За стадією зародження ланцюга реакцій слідує стадія розвитку і обриву ланцюгу, які протікають у вигляді реакцій:



В загальній кількості ці реакції включають до 900 стадій [7-9], які включають реакції утворення, взаємодії між собою і руйнування декількох десятків речовин. Серед них

великий інтерес представляють радикал $\text{CH}_3^\bullet$, формальдегід і метанол.

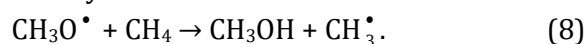
Однією з визначальних реакцій окиснення метану є реакція:



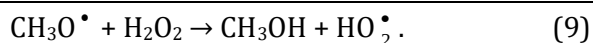
Рівновага цієї реакції зсувається вліво за високих температур і вправо за низьких. Радикал $\text{CH}_3^\bullet$ відіграє велику роль за високих температур. Обрив ланцюгу відбувається під час руйнування радикалів, в основному на стінці реактору.

Згідно з літературними даними [7-9; 13-15] радикали $\text{CH}_3\text{O}_2^\bullet$ ведуть здебільшого до глибокого окиснення метану, тоді як $\text{CH}_3^\bullet$ – до реакцій конденсації метану (наприклад, реакція (7)).

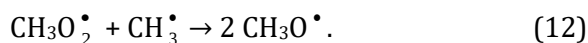
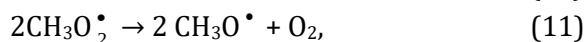
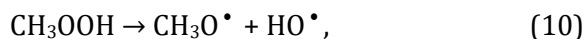
Метанол утворюється з великою ймовірністю за високих тисків і високих співвідношень концентрацій $\text{CH}_4:\text{O}_2$. Головна реакція, що приводить до утворення метанолу:



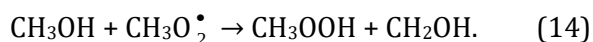
За високих тисків (5–10 МПа) відносна роль різних стадій змінюється. Вихід метанолу збільшується, а формальдегіду зменшується. Крім того, метанол може утворюватися за реакцією:



Утворення радикалу $\text{CH}_3\text{O}^\bullet$ можливе за реакціями:



Сам метанол руйнується за реакціями:

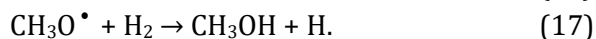
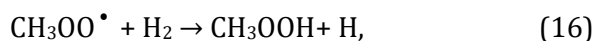


За високотемпературного глибокого окиснення метану більш ймовірні реакції атомів Н, О, радикалу $\text{HO}^\bullet$, ніж радикалів $\text{CH}_3^\bullet$, $\text{CH}_3\text{O}_2^\bullet$, $\text{CH}_3\text{O}^\bullet$. Взаємодія радикалів зі стінкою реактору за високих тисків менш ймовірна, ніж за низьких [8–10; 15].

За 5–10 МПа і 673–873 К вихід метанолу може теоретично досягати декількох відсотків в перерахунку на метан. Для цієї мети використовуються суміші з дуже високим співвідношенням $\text{CH}_4:\text{O}_2 = 30\text{--}100$. За $\text{CH}_4:\text{O}_2 = 50$ вихід метанолу на пілотній установці досягає 1 %, а селективність ~50 % за 100 % конверсії кисню [12–13]. Селективність може бути збільшена для прямої рекомбінації радикалів [12–13]:



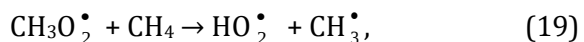
Вихід метанолу також може бути збільшений після додавання до суміші водню за реакціями:



На відміну від метанолу формальдегід утворюється з великою ймовірністю за низьких тисків і низьких співвідношень $\text{CH}_4:\text{O}_2$. Він утворюється під час розкладання $\text{CH}_3\text{O}^\bullet\text{OH}$ за реакцією (16), і потім за реакцією



із радикалу $\text{CH}_3\text{O}^\bullet$. Попередник формальдегіду – гідропероксид – здебільшого утворюється за реакцією [5–11; 13–15]:

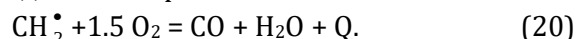


тобто із радикалу $\text{CH}_3\text{O}_2^\bullet$.

В [12] наведені результати розрахунків за температури 738 К і початкових концентрацій метану $3.2 \cdot 10^{18}$ і кисню 10^{18} молекул/см³, що показали наступні максимальні концентрації проміжних сполук, часток/см³:

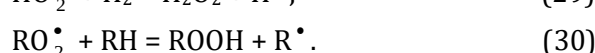
$\text{HO}_2^\bullet - 4.9 \cdot 10^{13}$, $\text{CH}_3\text{O}_2^\bullet - 3.9 \cdot 10^{12}$, $\text{CH}_3^\bullet - 4.7 \cdot 10^{12}$, $\text{CH}_3\text{OH} - 4 \cdot 10^{15}$, $\text{CH}_2\text{O} - 2 \cdot 10^{16}$, $\text{H}_2\text{O}_2 - 8 \cdot 10^{15}$. У відповідності з цими розрахунками, які підтверджуються результатами досліджень, вихід формальдегіду близько 1 % в перерахунку на метан, що вступив у реакцію, а вихід метанолу на один порядок нижчий.

За температур, вищих за 450 °С, відбувається гаряче займання вуглеводнів. Період індукції практично відсутній чи дуже короткий. Повне окиснення вуглеводнів супроводжується значним виділенням енергії і для досить важких молекул може бути представлено рівнянням:



Крім води і CO_2 до основних продуктів також можна віднести CO , звичайно, в залежності від умов, процес переходить в тепловий вибух чи відбувається самозаймання, яке супроводжується поширенням полум'я зі швидкістю до 100–300 м/с. Розігрів досягає 1800–2400 К.

У гарячому полум'ї вуглеводнів за температур вище 1200 К велику роль відіграють гідроксильний радикал і атоми кисню. Це видно з реакцій:



В цих реакціях горіння вуглеводнів роль атомів Н відіграють радикали $\text{R}^\bullet$. У ході горіння вуглеводнів утворюється велика кількість проміжних речовин (альдегіди, спирти, кислоти, CO , водень та інші), але, за умови достатнього вмісту кисню, єдиними кінцевими продуктами завершення реакції є вода і CO_2 .

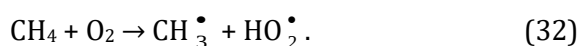
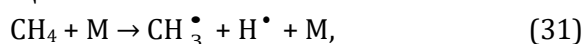
За відсутності внутрішньої CH_2 -групи, виділяються метан і етан із гомологічного ряду алканів. Тому більшість явищ, якими супроводжується окиснення вуглеводнів, а також ряд особливостей механізму, суттєво відрізняються від типового поведіння

важкіших гомологів. Перш за все, це відноситься до температурної межі, яка значно зсувається в бік збільшення температури. Для метану цей зсув перевищує 100 °C [5–8].

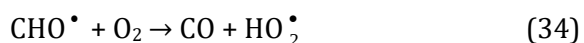
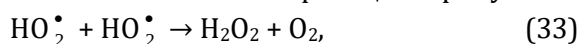
Горіння вуглеводнів за високих температур є складним хімічним процесом. Однак можливо виділити деякі особливості, достатньо загальні для горіння усіх палив. Розглянемо процес горіння в різноманітних умовах – за малих і за великих концентрацій радикалів. Перша ситуація характерна для процесів займання і досліджується в лабораторіях; друга ситуація відповідає умовам стаціонарного полум'я і досліджується на стабілізованих пальниках.

У процесі горіння газоподібного палива за малих концентрацій радикалів механізм визначається конкуренцією процесів розгалуження і обриву ланцюгів, а реакції радикальної взаємодії не важливі. Це добре простежується шляхом аналізу чутливості під час моделювання процесів горіння. В ході аналізу варіюється константа швидкості кожної стадії механізму і знаходиться чутливість найбільш цікавого і важливого параметру процесу до зміни вхідних величин [5–8].

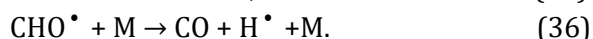
Затримки полум'я в збіднених сумішах $\text{CH}_4 - \text{O}_2$ чутливі до значень констант швидкостей реакцій за участю метану, переважно до констант швидкості реакцій зародження ланцюгів:



Менше важить вплив реакцій обриву:



і реакцій продовження і розгалуження ланцюгу:

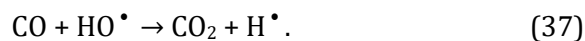
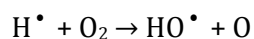


За умови добре розвинутого фронту полум'я взаємодія радикал – радикал дуже суттєва, бо концентрація активних центрів дуже висока.

Варнатц Ю. [5–6] показав, що першочергово молекули вуглеводневого палива вступають в реакцію з H , O і $\text{HO}^\bullet$. Алкільні радикали, які утворилися, дуже швидко розкладаються на менші – метильні

та етильні. Тільки найменші алкільні радикали ($\text{CH}_3^\bullet$ і $\text{C}_2\text{H}_5^\bullet$) дисоціюють повільніше відносно реакцій рекомбінації, диспропорціювання й окиснення атомів і молекул. Ця частина кінетичного механізму визначається швидкістю полум'я насичених і ненасичених вуглеводнів [5–7; 10–16].

Згідно з цією схемою, горіння вуглеводнів визначається головним чином стадіями, які не залежать від природи палива:



Так відбувається звичайне згорання метану.

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. Температура електронів сягає до 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 у 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 частоти коливань молекул і електричного розряду.

Пружні зіткнення частинок характеризуються незмінним числом незалежних часток, які беруть участь у процесі, незмінністю внутрішньої структури цих частинок і незмінністю усіх видів енергій частинок, які визначаються квантовими числами: енергія внутріатомних електронів, енергія коливання атомів у 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. Після кожного йонізуючого удару утворюється один розсіяний і один вторинний електрон, сума енергій яких дорівнює енергії первинного електрону [17–18].

Одночасно відбувається йонізація молекул завдяки дисоціаційному прилипанню, яке протікає під час зіткнення електрону з молекулою з утворенням проміжного агента розпадного стану – негативно зарядженого йону типу AB^- , що 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 неполярних молекул (N_2 , CO , CO_2 , H_2 , H_2O , тощо) із-за малих значень відношення мас електронів і молекул, коливальне збудження електронним ударом відбувається в непряму зіткненні та малоефективне. У найсприятливіших умовах коливальне збудження молекул у плазмі дозволяє зосередити на проведенні хімічних процесів до 80 % усієї вкладеної розрядом енергії.

Пряма дисоціація молекул у результаті зіткнень з електронами, без збудження проміжними електронними станами досить неефективна в умовах низькотемпературної плазми. Значно більший вклад може давати ступінчасте збудження коливальних рівнів, ініційоване електронним ударом. Дисоціація призводить до зниження заселення коливальних рівнів, що викликає зменшення швидкості дисоціації в порівнянні з рівноважним значенням [19–22]. Так, внаслідок використання електронно-каталізу за частоти струму 50 Гц досягається економія газоподібного палива в середньому на 10–12 % [19–22].

В ідеальному випадку завдяки відсутності витрат енергії на руйнування молекул води кількість теплоти, що виділяється під час спалювання 1 моль метану, повинна складати не 891.88 кДж/моль [5–7], а $891.88 + 439.58 = 1331.46$ кДж/моль, тобто на 33 % більше, й, згідно з теоретичними розрахунками, економія палива може досягати того ж значення.

Одним із шляхів наближення до цього значення є використання високочастотного струму в ході створення низькотемпературної плазми.

Багатоатомній молекулі завжди властива певна симетрія, тобто ряд операцій обертання, віддзеркалень і обертання з наступним віддзеркаленням, які зберігають стан рівноваги молекул незмінним.

Багатоатомна молекула, що коливається, в кожний момент часу, знаходиться в стані складного коливального руху. Коливання окремих ступенів свободи взаємодіють між собою. Потенційна енергія цих коливань представляє квадратичну функцію від зсуву, містить, крім квадратів зміщення ще і їх добуток, що відповідає наявності зв'язку між коливаннями окремих ступенів свободи молекул. За нормальних коливань частинки одночасно проходять через рівноважне положення. Це свідчить про рівність відношень прискорення до уповільнення в окремих атомів. Такі зміщення є прямолінійними.

В незбудженому стані всі нормальні коливання проходять з мінімальною нульовою енергією. Під час поглинання кванту енергії молекулою зазвичай збуджується лише одне будь-яке звичайне коливання.

Кожне з коливань атомів в молекулах характеризується своєю частотою, значення якої для деяких молекул наведено в табл. 1. У таблиці 2 наведені значення частот коливань для певних зв'язків у молекулах, які характерні для різних видів вуглеводневих сполук. Частота коливань залежить лише від сил, які зв'язують атоми в молекулу.

В атомах і молекулах, які знаходяться в зовнішньому магнітному полі, виникає додатковий рух електронів, еквівалентний електричним струмам, що течуть у контурі. Індуковані струми створюють додаткове поле, яке діє на ядро в напрямку, протилежному напрямку зовнішнього поля.

Виникнення мікророзрядів в діелектричному бар'єрному розряді супроводжується появою високочастотного струму, спектр частот якого коливається від герц до гігагерц. Тобто значення частот коливання в молекулах потрапляють в межі коливань, за яких може виникнути така ситуація, коли атоми, що коливаються в молекулі, не зможуть знаходитися одночасно в положенні рівноваги. Тобто робота, яка проводиться силами першого нормального коливання на зсув другого коливання, не дорівнює нулю.

Table 1

Average values of vibration frequencies for molecules [23–27]

Таблиця 1

Середні значення частот коливань для молекул [23–27]		
Molecule	Frequency of molecular vibrations	
	sm ⁻¹	MHz
H ₂	3356.6	8.93
CH ₄	2983.2	10.05
C ₂ H ₆	2368.7	12.66
C ₃ H ₈	1278	12.46
O ₂	1405	21.3
N ₂	1227.9	3.27
CO ₂	1331.8	22.51
H ₂ O	2605.9	11.5
C ₂ H ₂	2860.04	10.48
CH ₂ O	3083.3	9.72

Table 2

Average values of vibration frequencies for different bonds [23–27]

Таблиця 2

Середні значення частот коливань для різних для різних фрагментів органічних молекул [23–27]

Chemical bond	Frequency of molecular vibrations	
	sm ⁻¹	MHz
—C—H	3300	9.084
=C—H	3020	9.93
>C—H	2960	10.13
—O—H	3680	8.15
>C=O	1700	17.63
—C≡C—	2050	14.62
>C=C<	1650	18.17
>C—C<	900	33.31

Великий інтерес представляє поєднання плазмохімічних процесів з каталітичними. Таке поєднання дозволить проведення процесів, які за звичайних умов або не протікають, або протікають з досить низькими виходами кінцевого продукту за високих енергетичних витратах.

Експериментальна частина

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 в вигляді двох коаксіально розташованих циліндрів, які приєднані до джерела змінного струму високої напруги. Розрядний об'єм генератору радикалів становив 25 см³. Для досліджень були використані каталізatori складу Cr –

18 %. Ni – 10 %. Ti – 1 %, інше – залізо, які показали найкращі результати в попередніх дослідженнях [19–22].

Дослідження процесу інтенсифікації горіння газоподібного палива в зоні «тихого» розряду проводили на лабораторній установці (рис. 2), яка складалася з балону, генератору радикалів, змішувача і пальника. Для запобігання горінню палива в самому каталізаторі, подача повітря здійснювалась над каталізатором. Через каталізатор проходило тільки газоподібне паливо. Засікали час нагріву певного об'єму води від початкової температури 8–20 °C до 98 °C. Об'єми води складав 100 см³. Кожний експеримент повторювали мінімум 2 рази до відтвореного результату з різницею не більше 3–4 секунд.

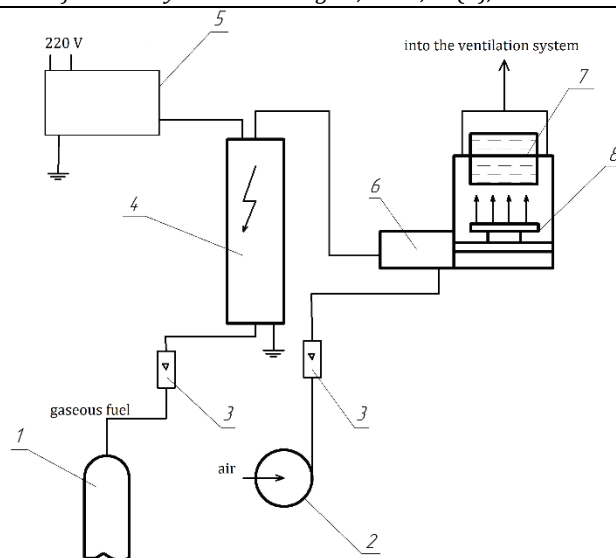


Fig. 2. Scheme of the experimental installation for electronic-catalytic intensification of the gaseous fuel combustion process

1 – cylinder with gaseous fuel (natural gas) 2 – compressor; 3 – rotameter; 4 – radical generator; 5 – power source; 6 – mixer; 7 – we heat the body; 8 – burner

Рис. 2. Схема дослідної установки з електронно-каталітичної інтенсифікації процесу горіння газоподібного палива

1 – балон з газоподібним паливом (природний газ); 2 – компресор; 3 – ротаметр; 4 – генератор радикалів; 5 – джерело живлення; 6 – змішувач; 7 – нагріване тіло; 8 – пальник.

Високочастотне джерело живлення дозволяло наступні параметри струму: напругу від 500 до 4500 В; частоту струму від 50 до 2500 Гц; форму синусоїди струму верхню, нижню і сумарну. Для визначення оптимального впливу електроннокаталізу і зменшення витрат енергії високочастотного розряду було використано електричний струм з сумарною, верхньою і нижньою синусоїдами.

Результати досліджень та їх обговорення

Використання високочастотного розряду може дозволити збільшити ефект від використання електронно-каталітичного процесу, оскільки використання високочастотного розряду дозволить змінити параметри електронно-каталітичного методу і знайти такі умови, за яких електронно-каталітичний процес найбільш ефективний.

Результати цих досліджень представлені на рис. 3, а на рис. 4 представлені розраховані залежності теплової потужності від частоти напруги. На рис. 5 представлені

експериментальні залежності потужності, що використовується на електронно-каталіз, від частоти. Як видно з рис. 3, напруга розряду (U) і частота суттєво впливають на процес електронно-каталітичної інтенсифікації процесу горіння. Так, за частот 0.5 кГц зміна температури не відрізняється від зміни температури за частоти 50 Гц. Результати досліджень за низьких напруг близько 1–1.5 кВ під час використання сумарної синусоїди представлені в [19–22]. За напруг до 3 кВ і за частот вище 2.5 кГц потужність, що споживається під час використання верхньої синусоїди, стає більшою, ніж на разі використання інших форм синусоїди. За низьких частот, до 1.5 кГц, і напругах 1, 2, 4 кВ значення потужності, що споживається на електронно-каталіз, за умови використання верхньої і сумарної синусоїд, мають близькі значення, а за напруг 1.5, 2.5 і 4 кВ вони майже однакові. Під час використання нижньої синусоїди потужність, що споживається, має середнє значення.

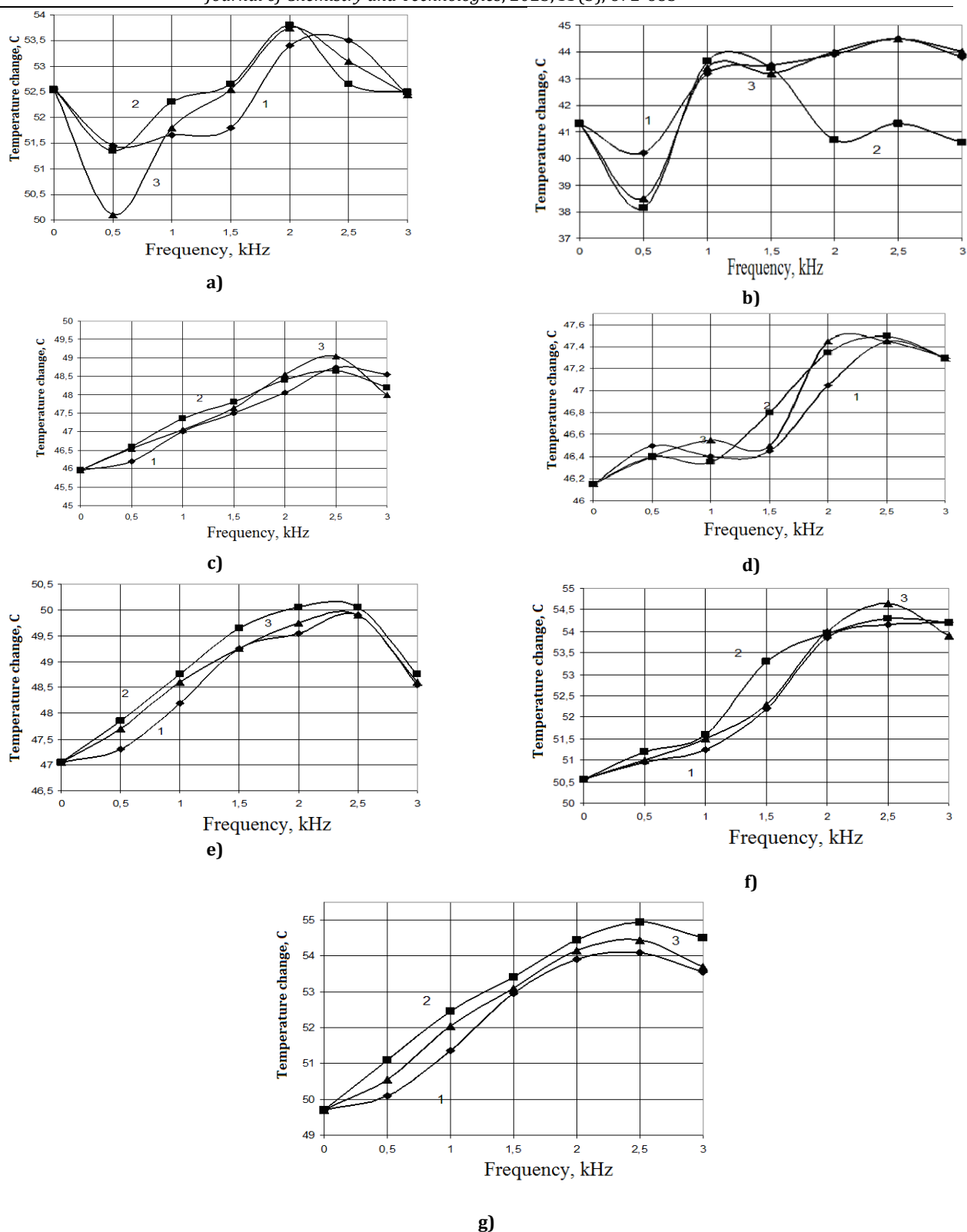


Fig. 3. Dependence of temperature change on frequency: a - $U=1$ kV; b - $U=1.5$ kV; c - $U=2$ kV; d - $U=2.5$ kV; e - $U=3$ kV; f - $U=3.5$ kV; g - $U=4$ kV.

1 - upper sinusoid; 2 - lower sinusoid; 3 - full sinusoid

Рис. 3. Залежність зміни температури від частоти: а - $U=1$ кВ; б - $U=1.5$ кВ; в - $U=2$ кВ; д - $U=2.5$ кВ; е - $U=3$ кВ; ф - $U=3.5$ кВ; г - $U=4$ кВ

1 - верхня синусоїда; 2 - нижня синусоїда; 3 - повна синусоїда

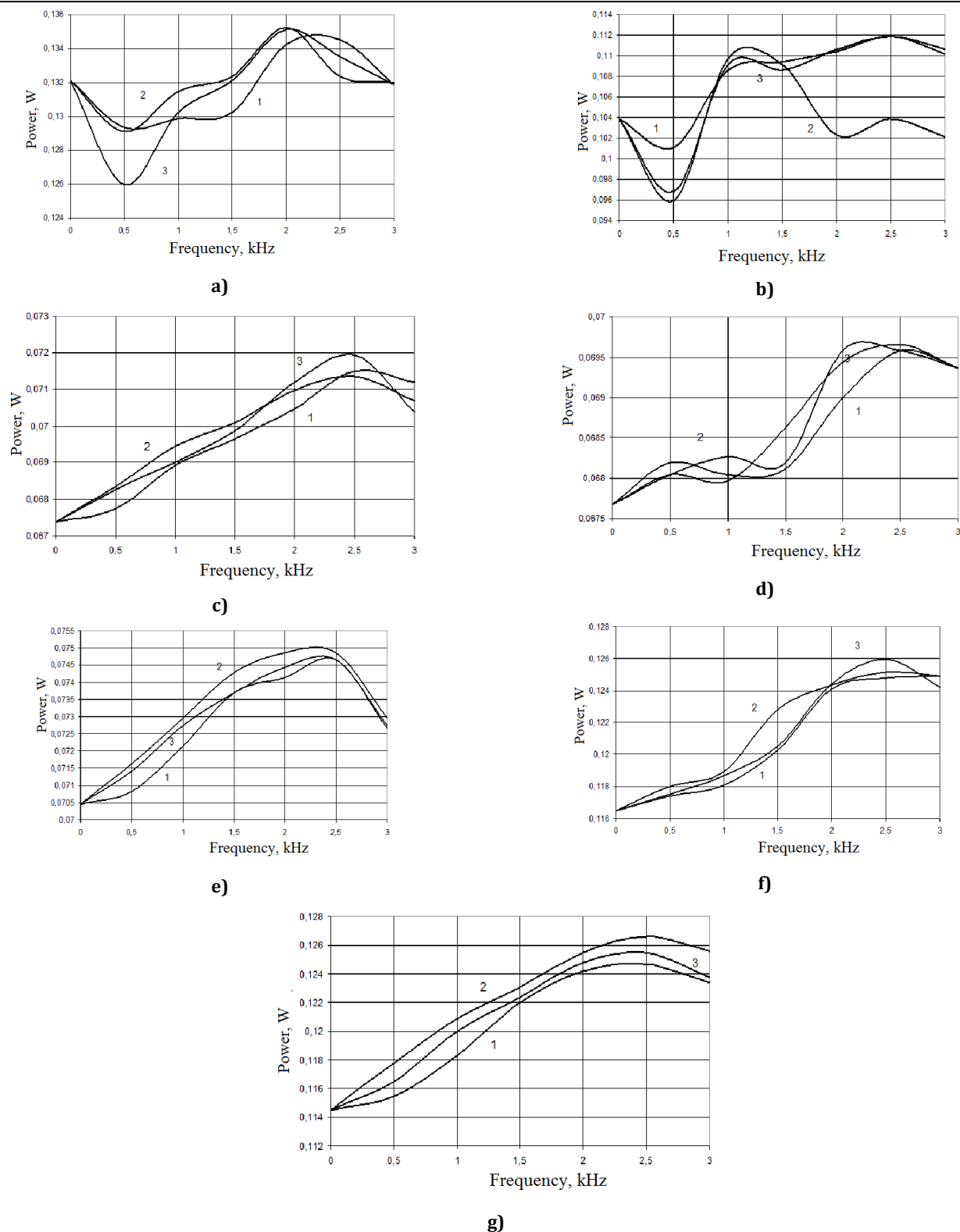
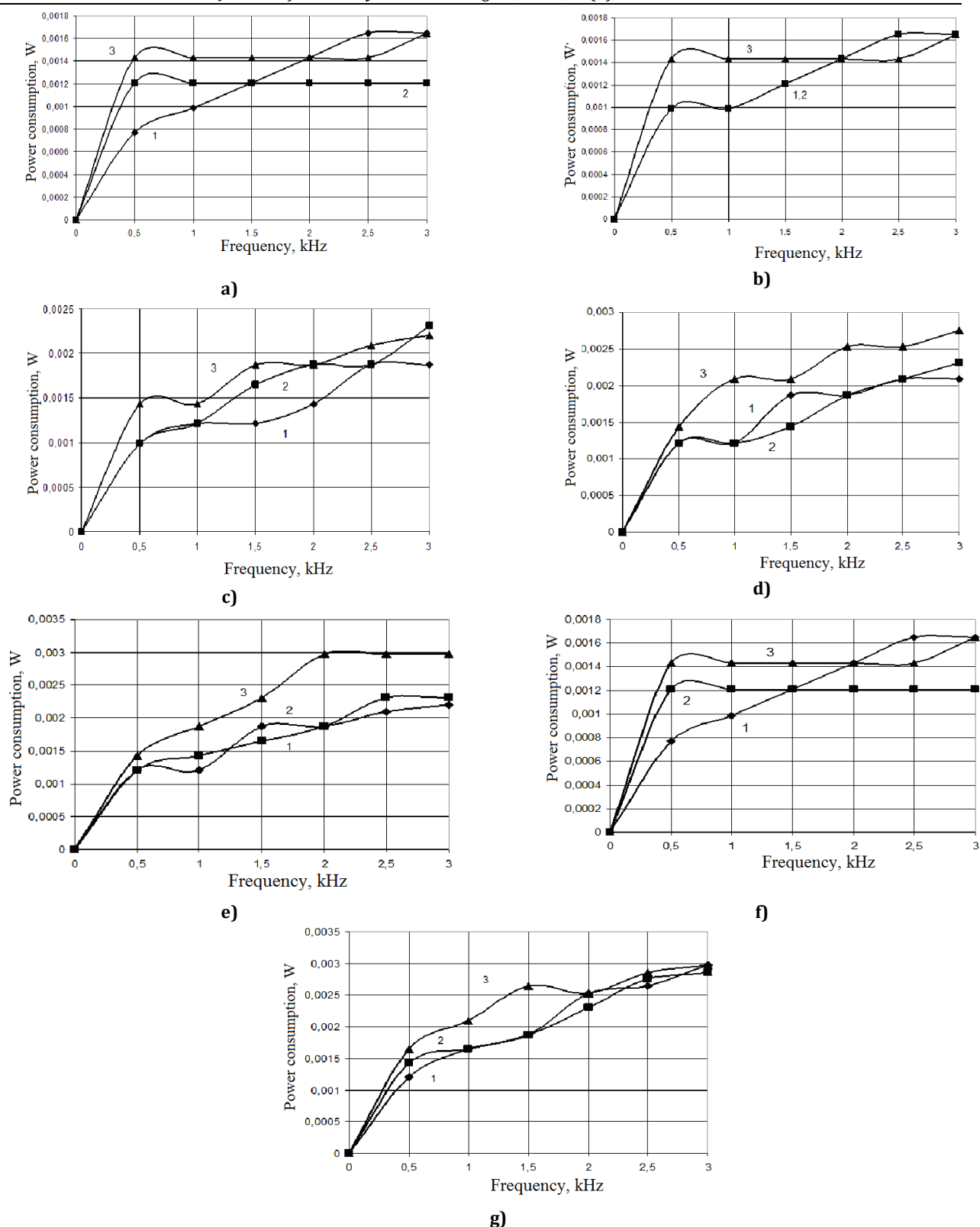


Fig. 4. Dependence of thermal power on voltage frequency: a - $U=1$ kV; b - $U=1.5$ kV; c - $U=2$ kV; d - $U=2.5$ kV; e - $U=3$ kV; f - $U=3.5$ kV; g - $U=4$ kV

1 - upper sinusoid; 2 - lower sinusoid; 3 - full sinusoid

Рис. 4. Залежність теплової потужності від частоти напруги: а - $U=1$ кВ; б - $U=1.5$ кВ; в - $U=2$ кВ; д - $U=2.5$ кВ; е - $U=3$ кВ; ф - $U=3.5$ кВ; г - $U=4$ кВ.

1 - верхня синусоїда; 2 - нижня синусоїда; 3 - повна синусоїда



**Fig. 5. Dependence of power consumption for electro-catalysis on voltage frequency: a – U=1 kV; b – U=1.5 kV; c – U=2 kV; d – U=2.5 kV; e – U=3 kV; f – U=3.5 kV; g – U=4 kV
1 – upper sinusoid; 2 – lower sinusoid; 3 – full sinusoid**

**Рис. 5. Залежність і потужності, що споживається на електронно-каталіз, від частоти напруги: а – U=1 кВ; б – U=1.5 кВ; в – U=2 кВ; г – U=2.5 кВ; е – U=3 кВ; ф – U=3.5 кВ; г – U=4 кВ.
1 – верхня синусоїда; 2 – нижня синусоїда; 3 – повна синусоїда**

The percentage value of power consumption for electro-catalysis from maximum power at different voltages and frequencies

Таблиця 3

Значення відсотку споживаємої потужності на електронно-каталіз від максимальної потужності за різних напруг і частот

Voltage. kV	Form sinusoid					
	Upper sinusoid		Full sinusoid		Lower sinusoid	
	%	Frequency. kHz	%	Частота. кГц	%	Frequency. kHz
1	1.227	2.5	1.06	2	0.895	2
1.5	1.43	2.5	1.43	2.5	1.282	1
2	2.52	2.5	2.5	2.5	2.95	2.5
2.5	2.753	2	3.62	2	2.73	2
3	3.08	2.5	4.02	2.5	2.80	2.5
3.5	1.29	2.5	1.12	2.5	0.96	2.5
4	2.06	2.5	2.028	2.5	2.177	2.5

Хвилеподібний характер залежностей змін температури для напруг 1 і 1.5 кВ можна пояснити тим, що за цих напруг за низьких частот недостатньо потужності розряду для стабільної роботи електроннокаталітичного процесу, і відбувається гасіння, пружне і непружне зіткнення електронів і частинок, частково відбувається припинення йонізації. Підвищення напруги розряду вище вказаних величин надає необхідну потужність для його протікання.

Як видно з рис. 4, за різних форм синусоїди струму потужність, що споживається, різна. Так, найбільші значення потужності, що споживається на електронно-каталіз, спостерігаються за умови використання сумарної синусоїди. За напруг до 3 кВ і за частот вище 2.5 кГц потужність, що споживається за використання верхньої синусоїди, стає більшою, ніж за використання інших форм синусоїди. за низьких частот, до 1.5 кГц, і напругах 1, 2, 4 кВ значення потужностей, що споживаються на електронно-каталіз за умою використання верхньої і сумарної синусоїд, мають близькі значення, а за напруг 1.5, 2.5 і 4 кВ вони майже однакові. Під час використання нижньої синусоїди спожита потужність має середнє значення.

Співставляючи потужність, що споживається, і максимальні значення теплової потужності для кожної форми синусоїди, видно, що вони різні для кожної напруги і частоти. В табл. 3 наведені значення частки потужності, що споживається на електронно-каталіз, від максимальної теплової потужності. Як видно з табл. 3, найбільший відсоток потужності, що споживається на електронно-каталіз, припадає на верхню і сумарну форми синусоїди. Для нижньої форми синусоїди цей

відсоток не перевищує 3 %, та одночасно для сумарної синусоїди й тієї ж напруги він більший 4 %, а для верхньої – більше 3 %. За збільшення напруги від 1 кВ до 3 кВ спостерігається збільшення відсотка енергії, що споживається. Подальше підвищення напруги приводить до падіння відсотку, але і теплова потужність також падає для усіх форм синусоїди.

Висновки.

Сам режим горіння є складаним і дуже розгалуженим процесом. Він протікає з утворенням великої кількості різноманітних речовин, час життя для більшості з яких дуже малий. В ньому можна виділити три температурних режими, які сильно відрізняються за механізмом процесів: низькотемпературний режим (температура ≤ 160 °C), середній температурний режим (250–400 °C), режим горіння (> 450). І, впливаючи на кожний з режимів, можна впливати на витрати та інтенсивність горіння пального, викиди в навколишнє середовище.

Використання високочастотного розряду дозволяє збільшити ефект від використання електронно-каталітичного процесу.

Так, було встановлено:

- за низьких напруг, близько 1–1.5 кВ, утворення тепла нижче, ніж досягалися в контрольному досліді. За умови підвищення частоти до 2–2.5 кГц відбувається суттєве збільшення тепла. За частот вище 2.5 кГц спостерігається різке зменшення температури, але водночас присутнє незначне зростання температури в порівнянні з контрольним дослідом;

- напруга розряду також впливає на процес електронно-каталітичної інтенсифікації процесу горіння. Так, за напруги 1 кВ збільшення температури незначне, і лише за

частот 2–2.5 кГц збільшення теплової потужності досягає 2 % в порівнянні з контрольним дослідом. Поступове збільшення напруги веде до збільшення теплової потужності й може досягати за напруги 4 кВ і частоті 2.5 кГц більше 10 %;

- з аналізу впливу форми синусоїди на процес інтенсифікації процесу горіння видно, що найбільше зростання теплової потужності спостерігається за сумарної синусоїди, а найменший приріст теплової потужності – за верхньої синусоїди. Але, проаналізувавши зв'язок потужності, що споживається, та збільшення теплової потужності, можна зробити висновок, що нижня синусоїда має оптимальні співвідношення цих величин;

- з аналізу залежності потужності, що споживається на електронно-каталіз за різних напруг і частот видно, що зі збільшенням напруги збільшується і потужність, що споживається. Максимальні значення потужності, що споживається на електронно-каталіз, спостерігаються під час використання

сумарної синусоїди. За напруг до 3 кВ і частотах вище 2.5 кГц за умови використання верхньої синусоїди споживана потужність стає більше, ніж за використання інших форм синусоїди. За низьких частотах, до 1.5 кГц, і напругах 1, 2, 4 кВ значення потужності, що споживається на електронно-каталіз, за використання верхньої і сумарної синусоїд мають близькі значення, а за напруг 1.5. 2.5 і 4 кВ вони майже однакові. За використання нижньої синусоїди потужність, що споживається, має середнє значення.

Виходячи з усього сказаного можна стверджувати, що під час використання електронно-каталітичного горіння природного газу з високочастотним розрядом оптимальними параметрами є: напруга розряду – 2.5–3 кВ, частота – 2.4 кГц і сумарна форма синусоїди. В подальших дослідженнях планується продовжити дослідження електронно-каталітичного горіння природного газу за частот більше 3 кГц та інших каталізаторах.

References

- [1] Energy economics. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics.html>
- [2] *bp Energy Outlook 2024 edition*. (2024). British Petroleum.
- [3] [Global gas consumption will reach a record in 2025 — MEA]. (In Ukrainian). https://enkorrr.ua/ru/news/svtove_vikoristannya_gaz_u_dosyagne_rekordu_2025_roku_mea/260915
- [4] Natural Gas statistics <https://www.worldometers.info/gas/>
- [5] Warnatz, J., Maas, U., Dibble, R.W. (2006). *Combustion. Physical and Chemical Fundamentals. Modeling and Simulation. Experiments. Pollutant Formation*. 4th Edition. Springer-Verlag
- [6] Warnatz, J. (1984). *Rate Coefficients in the C/H/O System*. In: Gardiner Jr., W.C., Ed.. *Combustion Chemistry. Book Chapter*. Springer-Verlag. New York.
- [7] Konnov, A. (2019). Yet another kinetic mechanism for hydrogen combustion. *Combustion and Flame*, 203, 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.01.032>
- [8] Hu, X., Chen, J., Lin, Q., Konnov, A. A. (2024). Experimental and kinetic modeling study of the laminar burning velocity of CH₄/H₂ mixtures under oxy-fuel conditions. *Fuel*, 15, 132597. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.132597>
- [9] Kohse-Höinghaus, K. (2024). Combustion. Chemistry. and Carbon Neutrality. *Chem. Rev.*, 123(8), 5139–5219. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00828>
- [10] Kirkpatrick, A. T., Kuo, K. K. (2024). *Principles of Combustion*. Wiley.
- [11] Kuo, K. K., Acharya, R. (2012). *Fundamentals of Turbulent and Multiphase Combustion*. Wiley.
- [12] Pitchai, R., Klier, K. (2006) Partial Oxidation of Methane. *Catalysis Reviews. Science and Engineering*, 13–88.
- [13] Peters, N. (2000). *Turbulent combustion*. Cambridge: Syndicate of university of Cambridge.
- [14] Baulch, D.L., Cobos, C.J., Cox, R.A. (1992). Evaluated kinetic data for combustion modelling. *J. Phys. Chem. Ref. Data*. 21. 411–734.
- [15] Hughes, K. J., Turanyi, T., Clague, A. R., Pilling, M. J. (2001). Development and Testing of a Comprehensive Chemical Mechanism for the Oxidation of Methane. *J Chem Kinet*, 33(9), 513–538.
- [16] Lipkowski, J., Ross, P. N. (1998). *Electrocatalysis*. New York: John Wiley and S. Ltd.
- [17] Clarke, T. B., Krushinski, L. E., Vannoy, K. J., Colón-Quintana, G., Roy, K., Rana, A., Renault, C., Hill, M. L., Dick Single, J. E. (2024). Entity Electrocatalysis. *Chem. Rev.*, 124(15), 9015–9080 <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.3c00723>
- [18] Padavala, S. K. M., Stoezinge, K. A. (2023). Role of Hydride Formation in Electrocatalysis for Sustainable Chemical Transformations. *C.S. Catal.*, 13(7), 4544–4551. <https://doi.org/10.1021/acscatal.3c00204>
- [19] Viazovyyk, 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, 33–35.
- [20] Viazovyyk, V. (2011). Optimization of process of burning of gaseous fuel. 1 *International Scientific and Practical Conference "Advanced Development of Science and Technology"*. Przemysl. Polska, 97–99.
- [21] Stolyarenko, H. S., Vyazovyyk, V. M., Vodyanyk, O. V. (2010). Electrocatalytic intensification of gaseous fuel combustion. *Bulletin of the National Technical University. Kharkiv Polytechnic Institute*, 13, 112–120
- [22] Viazovyyk, V. (2023). Electronocatalytic intensification combustion of gaseous fuel. *Journal of Chemistry and*

-
- Technologies*, 31(1), 186–194.
<https://doi.org/10.15421/jchemtech.v31i1.271226>
- [23] Herzberg, G. (2012). *The Spectra and Structures of Simple Free Radicals: An Introduction to Molecular Spectroscopy* Dover Publications. First Edition.
- [24] Cyvin, S. J. (1968). *Molecular Vibrations and Mean Square Amplitudes*. Elsevier Science Ltd.
- [25] Tannous, C. (2022). *Vibrations of Molecules and Solids*. Université de Brest.
- [26] Wilson, E. B., Decius, J. C., Cross, P. C. (1980). *Molecular Vibrations: The Theory of Infrared and Raman Vibrational Spectra*. Courier Corporation
- [27] Wahab, M. A. (2022). *Symmetry Representations of Molecular Vibrations*. Springer Nature Singapore.