

## ВІДЗИВ

офіційного опонента

на дисертаційну роботу Зінченка Антона Євгеновича  
«Кінетика утворення та загартування  $\text{NO}_x$  у високочастотній індукційній плазмі», представленої на здобуття ступеня доктора філософії в галузі знань  
10 Природничі науки за спеціальністю «105 Прикладна фізика та наноматеріали»

Дисертаційна робота Зінченко Антона Євгеновича присвячена експериментальному та теоретичному дослідженню процесу утворення оксидів азоту великих обсягів та концентрацій в хімічно чистій повітряній плазмі високочастотної індукційної (ВЧІ) плазмової системи.

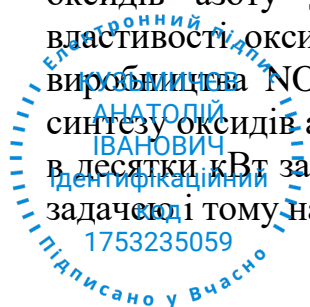
Актуальність даної роботи полягає у тому, що на сьогоднішній час існує замовлення як промисловості так і галузі охорони здоров'я на хімічно чисті газові суміші оксидів азоту. У зв'язку з тим, що оксиди азоту в промислових масштабах одержують з аміаку, який утворюють від викопних палив, тому зниження залежності від вуглеводнів і здешевлення виробництва  $\text{NO}_x$  робить це завдання нетривіальним. Плазмохімічна технологія виробництва оксидів азоту із навколишнього повітря має глибоку історію. Але вимоги хімічної чистоти газової суміші, безперервності роботи плазмової системи з утворенням оксидів азоту великих обсягів та концентрацій значно знижують цінність попередніх напрацювань із використанням електродних плазмотронів, та потребують приділити особливу увагу до методів по загартуванню оксидів азоту.

Враховуючи вище сказане та маючи на увазі, що дані, отримані у даній роботі, можуть бути використані при проектуванні промислових плазмових систем синтезу де необхідна висока швидкість загартування, то актуальність теми дисертаційної роботи не викликає ніяких сумнівів.

Структурно дисертація складається з вступу, п'ятих розділів, висновків, списку використаних літературних джерел та додатку.

У вступі приведено обґрунтування вибору теми дослідження, актуальність теми, сформульовано мету і задачі дослідження, які наукові завдання розв'язувались для досягнення обраної мети. Відображено наукову новизну, практичне значення роботи та одержаних результатів, визначено особистий внесок здобувача, представлені відомості про апробацію результатів дисертації та публікації.

У першому розділі наведено першу частину огляду літератури з питань по темі дисертації, у якому відображено аналіз сучасного стану отримання оксидів азоту для промислових застосувань. Розглянуто фізико-хімічні властивості оксидів азоту, механізми його утворення та плазмові технології виробництва  $\text{NO}_x$ , показано перспективність використання ВЧІ плазми для синтезу оксидів азоту. Наголошується, що реалізація ВЧІ розряду, потужністю в десятки кВт за атмосферних тисків і вище є достатньо складною технічною задачею і тому на сьогоднішній час практично не досліджена.



У другому розділі наведено другу частину огляду літератури з питань по темі дисертації, у якому розглядається сучасний стан та недоліки синтезу оксиду азоту у промислових масштабах за допомогою аміаку. Проводиться обґрунтування технології утворення  $\text{NO}_x$  за допомогою ВЧІ плазмової системи, як найбільш перспективної, що найкращим чином задовольняє обраним та узгодженим із промисловим замовником основним вимогам до процесу синтезу оксидів азоту.

У третьому розділі представлено технічні рішення з розробки промислової плазмової установки для дослідження утворення оксидів азоту за допомогою ВЧ індукційної плазми. Наведено методи, що використовувались для вимірювання концентрації оксидів азоту у продуктах плазмохімічної реакції вихідного сопла плазмотрона та на виході із плазмохімічного реактору. Описані декілька варіантів спеціально спроектованих гартувальних пристроїв та плазмових реакторів. Використання такого комплексу методів дало можливість забезпечити стабільність роботи плазми, захист від змін критичних режимних параметрів установки, досліджувати склад та концентрації вихідних газів сумісно із оптимізацією процесу інтенсифікації загартування оксидів азоту.

У четвертому розділі наводяться результати досліджень процесу синтезу оксидів азоту у ВЧ індуктивній розрядній камері плазмотрона. Заради даного дослідження було розроблено розрахункову модель утворення  $\text{NO}_x$  у ВЧІ плазмотроні. Здобувач підкреслює, що детальне вивчення еволюції компонентів усередині ВЧ індуктивному плазмотроні також дозволить отримати додаткові дані, що можуть бути використані заради підвищення ефективності утворення необхідних компонентів. Для аналізу кінетики формування оксидів азоту у ВЧІ розрядній камері та зоні загартування було використано програмне забезпечення ZDPlascin з модулем BOLSIG+, що були розраховані для вирішення кінетичних розрахунків квазірівноважної плазми з не Максвеллівською функцією розподілу електронів за енергією. За відсутності даних про електричне поле в плазмі потужного ВЧІ розряду на сьогоднішній час, автор використовуючи припущення про рівноважність повітряної плазми ВЧІ розряду атмосферного тиску та застосовує розподіл Максвелла для розрахунку констант швидкостей процесів за участі електронів. Таким чином замість обов'язкового вхідного параметру для даного програмного забезпечення – приведенного електричного поля до концентрації нейтральних частинок плазми, було створено модель системи з градієнтами температур за часом та координатами усередині плазмотрону. Такий підхід дозволив використати просторовий профіль розподілу температури в розрядній камері, який було взято з вже відомої моделі плазмотрону. Моделювання дозволило зробити низку висновків щодо розташування у ВЧІ плазмотроні оптимальних зон для утворення оксиду азоту та характер зміни його концентрації в залежності від положення у плазмотроні. Автор підкреслює, що врахування залежності констант швидкостей хімічних процесів від внутрішньої енергії коливального

збудження суттєво впливає на результати моделювання та зменшує розбіжності з експериментом.

У п'ятому розділі автором показані результати вимірювань концентрації оксиду азоту методом оптичної діагностики плазмового факела на виході із ВЧІ розрядної камери. Ці результати вказують на високу ефективність утворення оксидів азоту в плазмі ВЧІ розряду створеної установки. Подальші роботи з оптимізації виходу оксидів азоту у ВЧІ плазмової системі свідчать про значно низьку швидкість загартування за допомогою тільки водоохолоджувальних стінок плазмового реактору. Дослідження загартування за рахунок змішування з холодним повітрям показало, що при збільшенні витрат охолоджуючого повітря значно підвищується швидкість загартування та вирівнюється радіальний розподіл температури потоку на виході із секції загартування плазмового реактору. Але відмічається, що у той же час присутні і приосьові ділянки з підвищеною температурою, яких слід уникати під час проектування основного теплообмінного апарату гартувального реактора. Методом чисельного моделювання кінетики плазмохімічних процесів в плазмі повітря також визначали оптимальні умови збереження концентрації оксидів азоту при загартуванні. Встановлено оптимальний температурний інтервал зміни швидкості охолодження та вплив тиску на об'ємну частку утворюваного оксиду азоту.

У висновках однозначно сформульовано головні результати експериментальних та розрахункових досліджень. Експериментальні дослідження виконувалися сучасними та надійними методами, такими як: оптична спектроскопія, інфрачервона спектроскопія з перетворенням Фур'є, електрохімічний засіб встановлення концентрації оксидів азоту промисловим газовим аналізатором, відкаліброваним під високі рівні концентрацій. Підхід до комп'ютерного моделювання із застосуванням добре відомих програмних продуктів Ansys Fluent, Bolog+ та ZDPlascin цілком обґрунтовано, оскільки плазмова система досить складна і написання абсолютно нового коду для моделювання є окремою задачею. Розрахункові та експериментальні результати здобувача якісно збігаються як між собою, так і з відомими термодинамічними розрахунками, тому їх можна вважати аргументованими і достовірними, що є позитивною рисою даної дистанційної роботи.

Новизна основних положень дисертаційної роботи полягає в тому, що в ній:

1. Вперше проведено комплекс досліджень з одержання оксидів азоту у ВЧІ плазмовій системі високої потужності. Експериментальним шляхом отримані концентрації оксидів азоту ВЧІ плазмовою системою з використанням плазмотрона високого тиску.

2. Вперше, на основі експериментально одержаних результатів методами оптичної спектрометрії, отримані дані концентрацій молярних часток оксидів азоту повітряної ВЧ індукційно пов'язаної плазми.

3. Було проведено унікальне експериментальне дослідження залежності значень концентрації  $\text{NO}_x$  повітряної ВЧІ плазми від середньої швидкості загартування при використанні різних методів загартування.

4. Вперше виявлено ефект доокиснення NO в NO<sub>2</sub> при загартуванні плазмового повітряного потоку методами змішування з холодним повітрям та охолодженими продуктами рециклінгу вихлопного газу, що значно збільшує масовий вихід NO<sub>x</sub> та підвищує технічну і економічну привабливість майбутньої технології.

5. Вперше використано числове симулювання для дослідження кінетики утворення NO як в ізотермічній повітряній плазмі потужного ВЧІ розряду, так і в гартувальній зоні реактора за різних швидкостей спаду температури.

Матеріали дисертації з достатньою повнотою опубліковані у 4-х статтях, зазначених в дисертації. Науковці, що працюють у цій галузі досить в повній мірі могли ознайомитися з ними з 5-х доповідей на відповідних міжнародних та вітчизняних наукових конференціях.

В дисертації повністю розкрито основні результати й положення, що виносяться на захист, та вірно відображено зміст дисертаційної роботи.

Разом із цікавими фізичними результатами робота має і деякі недоліки, а саме:

1. На рисунку 5.10, указана розмірність K, а підпис осі графіку вказує на швидкість загартування.

2. Відсутність згадки про вимірювання тиску у експериментах, чи можливо, що підвищення концентрації це результат підвищення тиску?

3. У розділі 3 описано ВЧІ генератор налаштований для роботи плазмотрона на повітрі великої витрати, а модель температурного профілю плазмотрону у розділі 4 обрано для плазмотрону з низькою витратою повітря (60 л/хв).

Зроблені зауваження не ставлять під сумнів правильність, цінність та новизну основних положень та висновків дисертаційної роботи.

Аналіз виконаної Зінченко А. Є. дисертаційної роботи вказує, що вона є самостійним завершеним науковим дослідженням, в якому отримано нові актуальні, оригінальні та ретельно обґрунтовані експериментальні та розрахункові дані в області плазмохімії.

Вважаю, що дисертаційна робота «Кінетика утворення та загартування NO<sub>x</sub> у високочастотній індукційній плазмі» повністю відповідає вимогам що встановлені до присудження ступеня доктора філософії, а її автор – Зінченко Антон Євгенович безперечно заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 Природничі науки за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали».

Офіційний опонент,  
доктор технічних наук, професор  
кафедри електронні пристрої та системи  
Національного технічного університету  
України «Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»

А.І. Кузьмичев

**Документ підписано у сервісі Вчасно (продовження)**  
Відгук\_Кузьмичева.pdf

Документ відправлено: 17:15 16.12.2022

**Власник документу**

**Електронний підпис**

17:15 16.12.2022

Ідентифікаційний код: 1753235059

КУЗЬМИЧЕВ АНАТОЛІЙ ІВАНОВИЧ

Власник ключа: КУЗЬМИЧЕВ АНАТОЛІЙ ІВАНОВИЧ

Час перевірки КЕП/ЕЦП: 17:15 16.12.2022

Статус перевірки сертифікату: Сертифікат діє

Серійний номер: 248197DDFAB977E504000009AE3E200D765C703

Тип підпису: удосконалений