

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЙ МАЛОЕМІСІЙНОГО СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВ В ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНАХ

*Розглянуті питання підвищення екологічної безпеки сучасних стаціонарних газотурбінних двигунів. Розроблено універсальну математичну модель тривимірних хімічно реагуючих потоків, котра дає можливість прогнозувати вихідні температурні й екологічні характеристики камер згоряння, що працюють на газоподібному паливі. Розроблено рекомендації з удосконалення низькоемісійних камер згоряння, які дозволяють створювати нові зразки продукції, що задовольняють міжнародним нормам на викиди токсичних компонентів.*

**Ключові слова:** камера згоряння, математична модель, газотурбінний двигун, екологічні характеристики, токсичні компоненти.

*Рассмотрены вопросы повышения экологической безопасности современных стационарных газотурбинных двигателей. Разработана универсальная математическая модель трехмерных химически реагирующих потоков, которая дает возможность прогнозировать выходные температурные и экологические характеристики камер сгорания, работающих на газообразном топливе. Разработаны рекомендации по совершенствованию низкоэмиссионных камер сгорания, позволяющие создавать новые образцы продукции, удовлетворяющие международным нормам на выбросы токсичных компонентов.*

**Ключевые слова:** камера сгорания, математическая модель, газотурбинный двигатель, экологические характеристики, токсические компоненты.

*Problems of ecological safety improvement of the modern stationary gas turbine engines are considered. The universal mathematical model of three-dimensional chemically reactive flows, which has been developed, enables to forecast exit thermal and ecological characteristics for combustors, which use the gaseous fuels. The recommendations for improvement of low-emission combustors are developed and allow to build up the modern products, which satisfy the international standards for toxic components emission.*

**Key words:** combustor, mathematic model, gas turbine engine, ecological characteristics, toxic components.

### ВСТУП

Останнє десятиліття характеризується інтенсивним розвитком газотурбобудування в розвинених в технічному відношенні країнах світу, у тому числі і в Україні. Жорсткість міжнародних норм на рівні шкідливих викидів визначає актуальність і викликає необхідність комплексного рішення питань екологічного вдосконалювання енергетичних газотурбінних двигунів (ГТД) і установок на їх основі, що приводить до створення принципово нових технологій низькоемісійних камер згоряння.

Розробка й обґрунтований вибір математичних моделей процесів горіння в низькоемісійних камерах згоряння з урахуванням часткового попереднього перемішування палива з повітрям і упорскування водяної пари, а також апробація їх в умовах розв'язання тривимірної задачі хімічного реагування з метою підвищення ефективності технологій малоемісійного спалювання палив в газотурбінних двигунах є актуальним науковим завданням. Створення й впровадження

подібних методів у практику проектування ГТД дозволить різко зменшити вартість дослідно-дowodочних робіт і підвищити конкурентоспроможність українських газотурбінних двигунів.

### **ФОРМУЛЮВАННЯ ПРОБЛЕМИ**

На основі аналізу сучасних способів організації робочого процесу і тенденцій підвищення ефективності роботи паливоспалюючих пристроїв вже сформульовані основні вимоги, яким повинні відповідати низькоемісійні камери згоряння [1-6]. Для їх виконання необхідно підвищувати ефективність проектування й доводки низькоемісійних камер згоряння. Математичне моделювання робочих процесів у камерах з урахуванням часткового попереднього перемішування палива з повітрям і упорскування водяної пари при використанні сучасного програмного забезпечення розглядається як один із перспективних засобів, що дозволить різко зменшити вартість дослідних робіт і підвищити конкурентоспроможність українських ГТД.

Конкуренція на світовому ринку газотурбо-будування така, що фірми вже не можуть дозволити собі здійснювати експериментальне до-ведення нового двигуна протягом 10-15 років, як це було раніше. Це пояснюється тим, що створення повномасштабних моделей вузлів ГТД, натурних випробувальних стендів для них, а також проведення експерименту вимагає великих матеріальних витрат. Одночасно підвищуються вимоги до надійності, точності одержання робочих параметрів, ККД і екологічності двигунів. Отже, для задоволення всіх цих вимог необхідно розробляти принципово нові конструкції паливо-спалюючих пристроїв, переваги й недоліки яких доцільно виявляти ще на стадії проектування. Рішенням може бути проведення числового експерименту на тривимірних цифрових (віртуальних) моделях камер згоряння і їх елементів [7-10]. Цей підхід дозволяє проводити різноманітні розрахунки й одержувати корисну інформацію про структуру потоку в умовах неізотермічності, а також про розподіл концентрацій основних продуктів горіння й токсичних компонентів в об'ємі низькоемісійної камери згоряння.

*Метою дослідження є поліпшення ефективності технологій малоемісійного спалювання газоподібних палив в камерах згоряння з частковим попереднім перемішуванням палива з повітрям і упорскуванням водяної пари для газотурбінних двигунів стаціонарного типу.*

### **МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТРИВИМІРНИХ ХІМІЧНО РЕАГУЮЧИХ ПОТОКІВ**

Розроблена математична модель враховує особливості організації робочого процесу в камерах згоряння, у яких організується гомогенно-дифузійне горіння паливоповітряних сумішей, обумовлене як фізичними процесами сумішоутворення, так і кінетикою хімічних реакцій [7-9].

Модель хімічно реагуючих турбулентних потоків базується на системі диференціальних рівнянь нерозривності (1), збереження кількості руху (2), збереження енергії (3), переносу хімічних компонентів суміші (4) і оксидів азоту NO (5):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v}) = S_m; \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla(\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = \nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\mathbf{v}(\rho E + p)) = -\nabla \cdot \mathbf{J}_q + S_h; \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla(\rho \mathbf{v} Y_i) = -\nabla \cdot \mathbf{J}_i + R_i + S_i, \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{NO}) + \nabla(\rho \mathbf{v} Y_{NO}) = -\nabla \cdot (\rho D \nabla Y_{NO}) + S_{NO} \quad (5)$$

де  $\rho$  – масова густина;  $\mathcal{V}$  – вектор локальної швидкості;  $S_m$  – джерело, що визначає масу, яка вноситься до потоку,  $P$  – статичний тиск;  $\rho g^P$  – гравітаційна сила;  $F^P$  – зовнішні сили;  $\bar{\tau}$  – тензор тисків;  $E$  – внутрішня енергія;  $Y_i, Y_{NO}$  – масова концентрація хімічного компонента  $i$  та NO;  $J_q$  – густина теплового потоку суміші;  $J_j$  – густина дифузійного теплового потоку  $j$ -го компонента;  $S_h$  – джерело, що описує тепловиділення в результаті хімічних реакцій,  $S_i$  – рівень додаткового утворення  $i$ -го компонента з дисперсної фази або інших джерел;  $J_i$  – масова дифузія  $i$ -го компонента.  $R_i$  – рівень утворення  $i$ -го компонента в результаті хімічної реакції,  $D$  – коефіцієнт дифузії,  $S_{NO}$  – джерело NO в залежності від механізму утворення.

Зазвичай швидкість хімічної реакції та рівень утворення  $R_i$  визначають величиною характерного масштабу перемішування  $k/\varepsilon$ . Однак у реальних конструкціях низькоемісійних камер згоряння ГТД завжди є ділянки попереднього змішування пального і окислювача. Якщо використати модель горіння, що враховує тільки турбулентні характеристики, то можна одержати надмірно високу швидкість вигорання палива. Уникнути цього ефекту можна з огляду на вираз Ареніуса при розрахунку швидкості хімічних реакцій

$$k = AT^\beta e^{-E/RT},$$

де  $A, \beta, E$  – константи та енергія активації суміші.

У даному дослідженні запропоновано та протестовано п'ять кінетичних механізмів горіння газоподібного палива на базі метану з різними константами швидкості, які визначають різні рівні  $R_i$ . Вперше розроблені й верифіковані кінетичні механізми утворення й розкладання оксидів азоту й вуглецю в паливоспалюючих пристроях, які враховують часткове попереднє перемішування палива з повітрям, а також упорскування екологічної й енергетичної водяної пари.

Замикання системи рівнянь (1)-(5) проводиться шляхом додавання відповідних диференціальних рівнянь моделей турбулентності, напівемпіричних залежностей для тензора тисків, теплового й дифузійного потоків, а також рівняння стану суміші ідеальних газів. Залежності термодинамічних і теплофізичних властивостей газів від температури враховуються за допомогою апроксимуючих формул.

Проведено вибір моделей турбулентності для стаціонарного й нестаціонарного випадків. Для стаціонарних задач прогнозування характеристик низькоемісійних камер згоряння доведено можливість використання RNG різновиду стандартної  $k - \varepsilon$ -моделі турбулентності, яка є напів-емпіричною і являє собою сукупність диференціальних рівнянь переносу кінетичної енергії турбулентності  $k$  й питомої швидкості дисипації кінетичної енергії турбулентності  $\varepsilon$ .

У рівняннях RNG  $k - \varepsilon$ -моделі турбулентності (6, 7) в порівнянні зі стандартною моделлю присутні додаткова умова (8) і співвідношення (9) для обчислення турбулентної в'язкості, які дозволяють більш ефективно розраховувати гідродинамічні показники сильно закручених потоків.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\alpha_k \mu_{eff}) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k; \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\alpha_\varepsilon \mu_{eff}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon; \quad (7)$$

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta / \eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3 k}; \quad (8)$$

$$d \left( \frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon \mu}} \right) = 1,72 \frac{\hat{v}}{\sqrt{\hat{v}^3 - 1 + C_v}} d\hat{v}, \quad (9)$$

де  $\mu_{eff}$  – коефіцієнт ефективної в'язкості;  $G_k$  – генерація турбулентної кінетичної енергії від градієнтів осереднених швидкостей;  $G_b$  – генерація турбулентної кінетичної енергії в результаті плавучості для ідеальних газів;  $Y_M$  – внесок пульсаційного розширення;  $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}, C_\mu, C_\nu, \eta_0, \beta$  – емпіричні константи;  $S_k, S_\varepsilon$  – додаткові джерела для  $k$  і  $\varepsilon$ ;  $\alpha_k, \alpha_\varepsilon$  – величини зворотні значенням ефективних чисел Прандтля для  $k$  і  $\varepsilon$  відповідно;  $\eta = Sk/\varepsilon$ ;  $\hat{\nu} = \mu_{eff}/\mu$ ;  $\mu$  – коефіцієнт ламінарної в'язкості.

Для нестационарних розрахунків процесів в камерах згоряння та розрахунків флуктуацій швидкостей запропоновано використовувати модель великих вихрів або динамічну LES-модель турбулентності, де великомасштабні вихорі моделюються прямо, а дрібномасштабні – із застосуванням однієї з напівемпіричних моделей турбулентності.

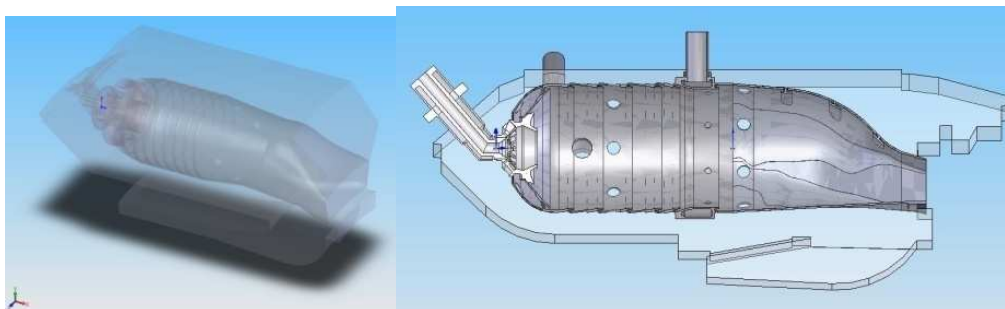
Для числового розв'язання системи диференціальних рівнянь, що описує фізико-хімічні процеси в низькоемісійних камерах згоряння ГТД, використано метод контрольного об'єму, реалізований в програмних комплексах ANSYS Fluent і ANSYS CFX.

Верифікація запропонованої математичної моделі проведена на базі експериментальних даних, отриманих при випробуваннях зворотно-вихрової камери згоряння «Торнадо» [10]. Дослідження аеродинамічної структури потоку в низькоемісійній зворотно-вихровій камері із застосуванням тривимірної моделі в умовах неізотермічності та ізотермічності потоків підтвердили достовірність математичної моделі, її адекватність фізичним процесам, якісні й кількісні узгодження експериментальних і розрахункових характеристик.

## РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЛОВИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ ПО ВДОСКОНАЛЕННЮ КАМЕР ЗГОРЯННЯ

Проведено моделювання процесів горіння в камерах згоряння двох типів: камері ГТД потужністю 25 МВт, у якій реалізовано принцип сухого горіння частково перемішаної бідної суміші, та камері газотурбінної установки типу «Водолій» потужністю 16 МВт з упорскуванням екологічної та енергетичної водяної пари (рис. 1).

Результати моделювання показують, що з п'яти розглянутих кінетичних схем горіння метану для розглянутих типів камер згоряння можна рекомендувати трьохреакційний механізм, що враховує розкладання діоксиду вуглецю. Його використання дозволило одержати не тільки коректне поле температур, але й прогнозувати викиди CO та NO<sub>x</sub> на більшості експериментальних режимів (рис. 2-4). П'ятиреакційний механізм, що додатково враховує утворення водню, може бути використаний не тільки для визначення температур, але й прогнозування емісії CO і NO<sub>x</sub> (рис. 3, 5) у камерах згоряння, у яких реалізований принцип сухого горіння частково перемішаної бідної суміші й максимальна температура в якій не перевищує 1900 К.



а б

**Рис. 1.** Тривимірні моделі камер згоряння:  
а – ГТД потужністю 25 МВт; б – ГТУ «Водолій» з упорскуванням пари

Показано, що концентрації атомарного кисню [O] залежать від максимальної температури в камері. Для режимів роботи низькоемісійної камери згоряння ГТД потужністю 25 МВт з максимальною температурою нижче 1900 К запропонована залежність для поля концентрацій атомарного кисню, яка разом із кінетичним п'ятиреакційним механізмом дозволяє коректно визначити рівень викидів оксидів азоту при моделюванні вигорання збіднених сумішей:

$$[O] = a \frac{k_1 k_2 \cdot [O_2][H_2]}{k_3 k_4 [H_2O]}$$

де  $a=12,5$  – емпіричний коефіцієнт;  $k_1 = 2 \cdot 10^{14} e^{70,3/RT}$ ,  $k_3 = 1,568 \cdot 10^{13} e^{3,52/RT}$  – константи швидкості прямої та зворотної реакції  $H+O_2=OH+O$ ;  $k_2 = 1 \cdot 10^8 T^{1,6} e^{138/RT}$ ,  $k_4 = 4,312 \cdot 10^8 T^{1,6} e^{76,46/RT}$  – константи швидкості прямої та зворотної реакції  $OH+H_2=H+H_2O$ .

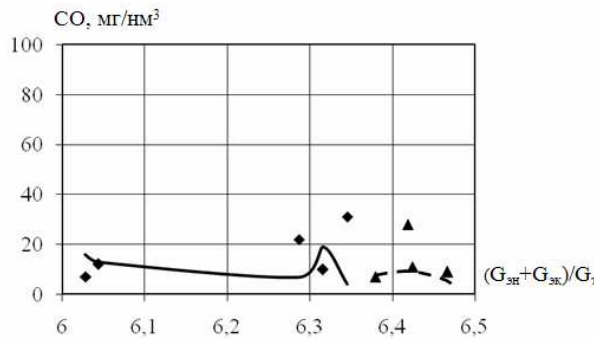


Рис. 2. Викиди CO для ГТУ «Водолій»:

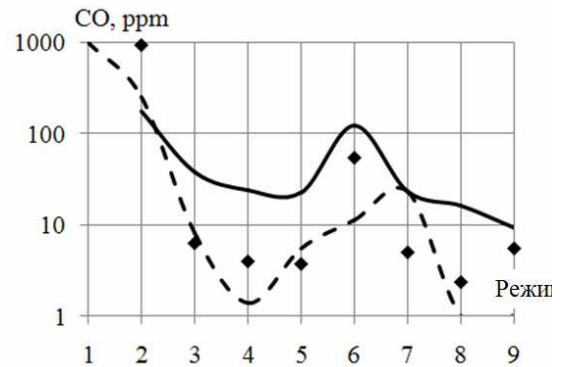
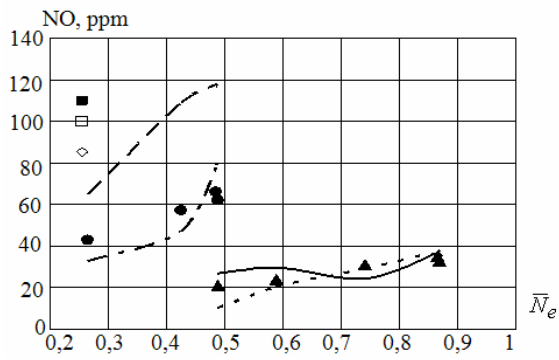
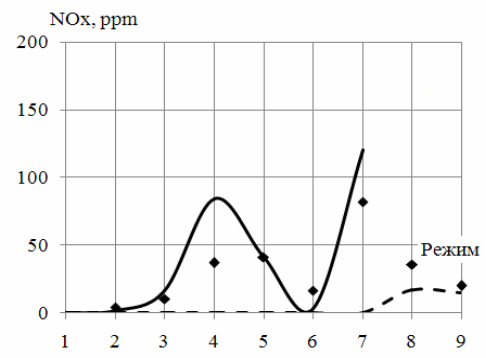


Рис. 3. Викиди оксиду вуглецю для ГТД потужністю 25 МВт за режимами:





**Рис. 4.** Порівняння емісії NO у камері згоряння ГТУ «Водолій»:



**Рис. 5.** Емісія оксидів азоту для ГТД потужністю 25 МВт:

◆

◆◆◆



На підставі узагальнення розрахункових даних з поліпшення температурних полів і екологічних характеристик камер згоряння ГТД потужністю 25 МВт та ГТУ типу «Водолій» розроблені практичні рекомендації відносно вибору раціональних геометричних та режимних параметрів камер.

Раціональна організація робочого процесу в камері згоряння ГТД потужністю 25 МВт забезпечить скорочення розрахункової емісії оксидів азоту з 16 до 1 ppm, зменшення максимальної розрахункової нерівномірності температурного поля у вихідному перерізі з 19 до 8,6 % при збереженні коефіцієнта повноти згоряння палива. Запропоновані конструктивні зміни жарової труби камери згоряння ГТУ «Водолій» з упорскуванням водяної пари дозволять зменшити розрахункові викиди оксидів азоту с 33 до 10 ppm, оксиду вуглецю з 12 до 4 ppm і розрахункову усереднену радіальну нерівномірності температурного поля на виході з 8 до 3,8 %. З огляду на обмеження та припущення математичної моделі на двигунах можна прогнозувати зниження викидів оксиду азоту в 1,5-2 рази зі збереженням емісії СО і зменшення втрат повного тиску на 7 % (відносних) для ГТД потужністю 25 МВт і зниження викидів оксиду азоту в 1,3-1,5 разів і СО на 20-25 % для ГТУ типу «Водолій».

### ВИСНОВКИ

1. Розроблено універсальну тривимірну математичну модель низькоемісійних газотурбінних камер згоряння ГТД, у яких організується гомогенно-дифузійне горіння паливоповітряних сумішей, обумовлене як фізичними процесами сумішоутворення, так і кінетикою хімічних реакцій.

2. Запропоновані і верифіковані ефективні кінетичні механізми окиснення газоподібного палива, що враховують часткове попереднє перемішування палива з повітрям, а також упорскування екологічної і енергетичної водяної пари і дозволяють коректно моделювати розподіл температур і концентрацій хімічних компонентів у низькоемісійних камерах згоряння ГТД.

3. На основі результатів математичного моделювання проаналізовані основні недоліки двох конструктивних типів низькоемісійних камер згоряння і дані практичні рекомендації з поліпшення температурного режиму й екологічних характеристик камер згоряння ГТД потужністю 25 МВт і ГТУ типу «Водолій» потужністю 16 МВт із упорскуванням екологічної й енергетичної водяної пари виробництва ДП «Науково-виробничий комплекс газотурбобудування» «Зоря»-«Машпроект» (м. Миколаїв).

### ЛІТЕРАТУРА

1. Романовський Г.Ф. Камери згоряння суднових газотурбінних двигунів: Навчальний посібник / Романовський Г.Ф., Сербін С.І. – Миколаїв: УДМТУ, 2000. – 259 с. – ISBN 5-87848-019-0.
2. Постников А.М. Снижение оксидов азота в выхлопных газах ГТУ / Постников А.М.; под ред. д.т.н., проф. Грищенко Е.А. – Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2002. – 286 с. – ISBN 5.93424-081-1.
3. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД / Лефевр А.; пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 566 с.
4. Христин В.А. Газотурбинные двигатели и защита окружающей среды / Христин В.А., Тумановский А.Г. – К.: Техника, 1983. – 144 с.
5. Willis J.D. Industrial RB211 DLE Gas Turbine Combustion Update / Willis J.D., Moran A.J. // ASME, 2000. – GT2000-109. – 6 p.
6. NOx Emissions Reduction in an Innovative Industrial Gas Turbine Combustor (GE10 Machine): A Numerical Study of the Benefits of a New Pilot System of Flame Structure and Emissions / [A. Andreini, B. Facchini, L. Mangani A. Asti, G. Ceccherini, R. Modì] // ASME, 2005. – GT2005-68364. – 13 p.
7. Варнатц Ю. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ / Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р.; пер. с англ. Г.Л. Агафонова.; под ред. П.А. Власова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 352 с.
8. Сербин С.И. Исследование структуры течения во фронтном устройстве камеры сгорания газотурбинного двигателя мощностью 25 МВт / Сербин С.И., Мостипаненко А.Б., Вилкул В.В. // Авиационно-космическая техника и технология. – Харьков «ХАИ», 2005. – № 8(24). – С. 146-149.

9. Сербін С.І. Числове моделювання процесів горіння в експериментальному відсіку гібридної камери згорання ГТД потужністю 25 МВт / Сербін С.І., Мостіпаненко Г.Б. // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2006. – № 5. – С. 59-66.
10. Matveev I. CFD Calculations of Reverse Vortex Reactive Flows / Matveev I., Serbin S., Mostipanenko A. // 3-rd Int. Workshop and Exhibition on Plasma Assisted Combustion (IWEPEC). – Falls Church, USA, 2007. – P. 70-72.

Рецензенти:            д.т.н., професор Радченко М.І.;  
                              к.т.н., доцент Сирота О.А.

© Сербін С.І., Мостіпаненко Г.Б., 2010

*Стаття надійшла до редколегії 10.06.2010 р.*