

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЙ МАЛОЕМІСІЙНОГО СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВ В ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНАХ

Розглянуті питання підвищення екологічної безпеки сучасних стаціонарних газотурбінних двигунів. Розроблено універсальну математичну модель три-вимірних 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-доводочних 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 доведення 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 малоємісійного 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 ρ – масова густина; \mathbf{v} – вектор локальної швидкості; S_m – джерело, що визначає масу, яка вноситься до потоку, P – статичний тиск; ρg – гравітаційна сила; F – 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/ε . 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, β, 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 ε .

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.

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

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

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

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

де μ_{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_μ , C_v , η_0 , β – емпіричні константи; S_k , S_ε – додаткові джерела для k і ε ; α_k , α_ε – величини зворотні значенням ефективних чисел Прандтля для k і ε відповідно; $\eta = Sk/\varepsilon$; $\hat{v} = \mu_{eff}/\mu$; μ – 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, якісне й кількісне 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_x 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_x (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.

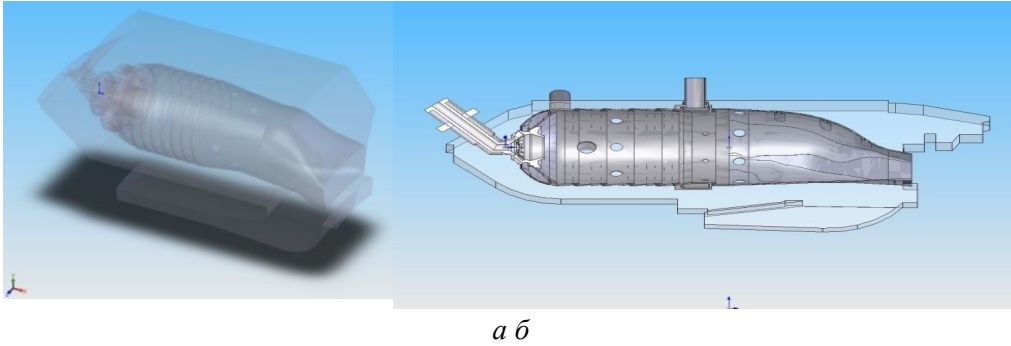


Рис. 1. Тривимірні моделі камер згоряння:
a – ГТД потужністю 25 МВт; *б* – ГТУ «Водолій» з упорскуванням пари

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:

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

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 $H+O_2=OH+O$; $k_2 = 1 \cdot 10^8 T^{1,6} e^{13,8/RT}$, $k_4 = 4,312 \cdot 10^8 T^{1,6} e^{76,46/RT}$ – константи швидкості прямої та зворотної реакції $OH+H_2=H+H_2O$.

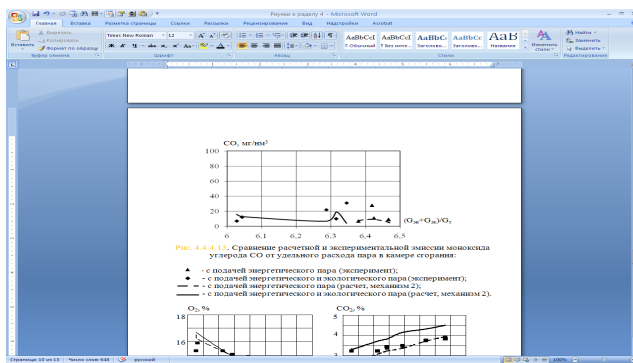


Рис. 2. Викиди CO для ГТУ «Водолій»:

– експерименти з подачею екологічної та енергетичної й екологічної пари; – розрахунки з трьохреакційним механізмом

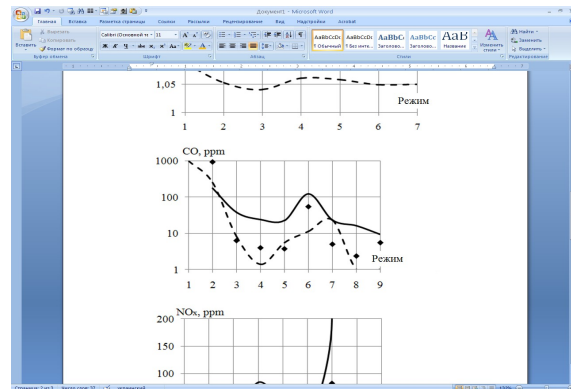


Рис. 3. Викиди оксиду вуглецю для ГТД потужністю 25 МВт за режимами:

– експеримент; – розрахунок з трьох-реакційним механізмом; – розрахунок з п'ятиреакційним механізмом

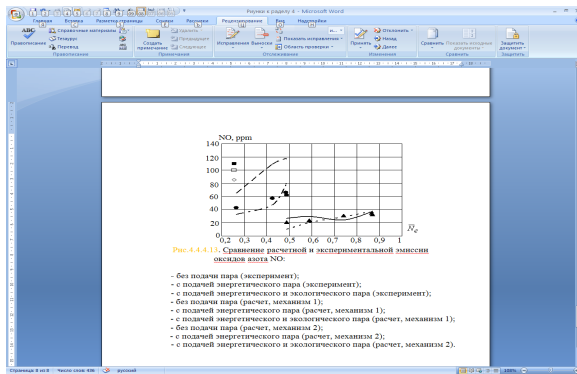


Рис. 4. Порівняння емісії NO у камері згоряння ГТУ «Водолій»:

□ - експеримент; ●, ▲, ◆ - розрахунки з 2-хреакційним механізмом; ■, ◇ - розрахунки з трьохреакційним механізмом

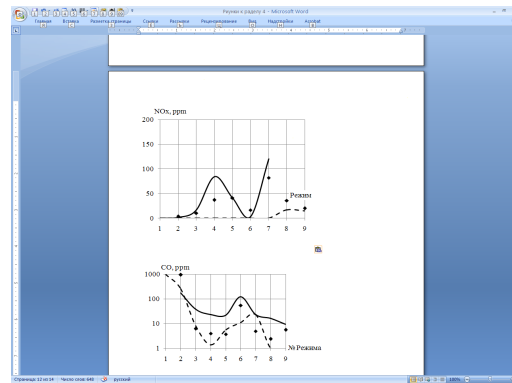


Рис. 5. Емісія оксидів азоту для ГТД потужністю 25 МВт:

□ - експеримент; ● - розрахунок з використанням п'ятиреакційного механізму та відомої залежності для обчислення [O]; ▲ - розрахунок з використанням запропонованої формули

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 CO 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 CO 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 газо-турбобудування» «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. Христич В.А. Газотурбинные двигатели и защита окружающей среды / Христич 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. Modi] // 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 згоряння 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 (IWEPAC). – 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.