

ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ ПРИ ВИКОРИСТАННІ НИЗЬКОЕМІСІЙНИХ КАМЕР ЗГОРЯННЯ

С. І. Сербін, проф., д-р техн. наук;
Г. Б. Мостіпаненко, канд. техн. наук

Національний університет кораблебудування, м. Миколаїв

Анотація. Розглянуто питання підвищення екологічної безпеки сучасних стаціонарних газотурбінних двигунів. Розроблено універсальну математичну модель тривимірних хімічно реагуючих потоків, яка дає можливість прогнозувати вихідні температурні й екологічні характеристики камер згоряння, що працюють на газоподібному паливі. Наведено рекомендації щодо вдосконалення низькоемісійних камер згоряння, які дозволяють створювати нові зразки продукції, що задовольняють міжнародні норми на викиди токсичних компонентів.

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

Аннотация. 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. Представлены рекомендации по совершенствованию низкоэмиссионных камер сгорания, позволяющие создавать новые образцы продукции, которые удовлетворяют международным нормам на выбросы токсичных компонентов.

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

Abstract. 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 the output thermal and ecological characteristics for combustors, which use the gaseous fuels. The recommendations on low-emission combustors improvement, which allows building up the modern products, satisfying the international standards for toxic components emission are developed.

Keywords: combustion chamber, mathematical modeling, gas turbine, environmental performance, toxic components.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Останні десятиліття характеризуються інтенсивним розвитком газотурбобудування в розвинених у технічному відношенні країнах світу, у тому

числі й в Україні. Жорсткість міжнародних норм на рівні шкідливих викидів визначає актуальність і викликає необхідність комплексного вирішення питань екологічного вдосконалювання енергетичних газотурбінних двигунів

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

(ГТД) та 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 як часткового попереднього перемішування палива з повітрям, так і впорскування водяної пари, а також апробація їх в умовах розв'язання тривимірної задачі хімічного реагування з метою підвищення ефективності технологій спалювання палив у газотурбінних двигунах є актуальним науковим завданням. Створення й впровадження подібних методів у практику проектування ГТД дозволять різко зменшити вартість дослідно-дowodочних робіт і підвищити конкурентоспроможність українських газотурбінних двигунів.

Економічність і безпека експлуатації енергетичних установок значною мірою визначаються ефективністю процесів спалювання палив. Резерви вдосконалення традиційної техніки спалювання практично вичерпані. Тому у світовій науці намітився перехід до новітніх технологій використання органічних палив, актуальність яких зростає в міру збільшення жорсткості екологічних вимог. У сфері газотурбінної техніки, де позиції України на світовому ринку в даний час достатньо вагомі, актуальним є комплексне розв'язання питань екологічного вдосконалення турбінних двигунів, що передбачає створення принципово нових конструкцій низькоемісійних камер згоряння ГТД. Розробка таких паливоспалюючих пристроїв повинна здійснюватися на основі знання теорії фізико-хімічних процесів турбулентного горіння, а також уміння моделювати їх особливості відповідно до складних тривимірних форм об'єктів і змін режимів їх роботи.

Розглядом різних аспектів проблеми екологічної чистоти й ефективності низькоемісійних паливоспалюючих пристроїв для газотурбінної техніки займаються наукові, проектні й виробничі організації як в Україні: Науково-виробничий комплекс газотурбобудування «Зоря»—«Машпроект», Національний університет кораблебудування, Національний технічний університет України «КПІ», ВАТ «Мотор Січ», так і за кордоном: General Electric Company, Solar Turbines Inc., ABB (США), Rolls-Royce Allison (Англія), Siemens Westinghouse (Німеччина), НВО «Сатурн» (Росія) та ін. Однак дотепер у світовій практиці не існує надійних методів теоретичного моделювання процесів у низькоемісійних камерах згоряння, які необхідні для оптимізації режимних і геометричних параметрів камер згоряння з погляду забезпечення мінімальної емісії токсичних речовин. Виходячи зі складності фізико-хімічних процесів, які мають місце в подібних об'єктах, актуальним є створення теорії низькоемісійного горіння й програмних засобів, які реалізують її в практичних системах.

В основу досліджень покладена наукова гіпотеза про можливість комплексного математичного опису фізико-хімічних процесів у низькоемісійних камерах згоряння ГТД за наявності як кінетичних, так і дифузійних механізмів поширення турбулентного полум'я в паливоповітряних сумішах різного складу. Такий підхід дає можливість проводити багатоваріантні експерименти з віртуальними моделями паливоспалюючих пристроїв і прогнозувати, а також значно поліпшувати їх екологічні характеристики на стадії попереднього проектування й модернізації енергетичних установок різних типів.

На основі аналізу сучасних способів організації робочого процесу і тенденцій підвищення ефективності роботи паливоспалюючих пристроїв уже сформульовані основні вимоги, яким повинні відповідати низькоемісійні камери згоряння [2–4, 7, 9, 10]. Для їх виконання необхідно підвищувати ефективність проектування й доводки низькоемісійних камер згоряння. Математичне моделювання робочих процесів у таких камерах при використанні сучасного програмного забезпечення розглядається як один з перспективних засобів, що дозволить різко зменшити вартість дослідних робіт і підвищити конкурентоспроможність українських ГТД.

Конкуренція на світовому ринку газотурбобудування 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 та екологічності двигунів. Отже, для задоволення всіх цих вимог необхідно розробляти принципово нові конструкції паливоспалюючих пристроїв, переваги й недоліки яких доцільно виявляти ще на стадії проектування. Рішенням може бути проведення числового експерименту на тривимірних цифрових (віртуальних) моделях камер згоряння та їх елементів [1, 5, 6, 8]. 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 низькоемісійного спалювання газоподібних палив у камерах згоряння з частковим попереднім перемішуванням палива з повітрям і впорскуванням водяної пари для газотурбінних двигунів стаціонарного типу.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Розроблена математична модель ураховує особливості організації робочого процесу в камерах згоряння, в яких відбувається гомогенно-дифузійне горіння паливовітряних сумішей, обумовлене як фізичними процесами сумішоутворення, так і кінетикою хімічних реакцій [1, 5, 6].

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{NO}) + \nabla(\rho \vec{v} Y_{NO}) = \\ = -\nabla \cdot (\rho D \nabla Y_{NO}) + S_{NO}, \end{aligned} \quad (5)$$

де ρ — масова густина; \vec{v} — вектор локальної швидкості; S_m — джерело, що визначає масу, яка вноситься до потоку; p — статичний тиск; $\rho \vec{g}$ — гравітаційна сила; \vec{F} — зовнішні сили; $\bar{\tau}$ — тензор тисків; E — внутрішня енергія; Y_i , Y_{NO} — масова концентрація хімічного компонента i та NO; \vec{J}_q — густина теплового потоку суміші; S_h — джерело, що описує тепловиділення в результаті

хімічних реакцій; S_i — рівень додаткового утворення i -го компонента з дисперсної фази або інших джерел; \bar{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.

Звичайно 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 та окиснювача. 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 Арреніуса при розрахунку швидкості хімічних реакцій

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

де A, β , — константи; E — 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 . Уперше розроблені й верифіковані кінетичні механізми утворення й розкладання оксидів азоту та вуглецю в паливоспалюючих пристро-

ях, 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 – ϵ -моделі турбулентності, яка є напівемпіричною і являє собою сукупність диференціальних рівнянь переносу кінетичної енергії турбулентності k та питомої швидкості дисипації кінетичної енергії турбулентності ϵ .

У рівняннях RNG k – ϵ -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:

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

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

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

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

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_{1e} , C_{2e} , C_{3e} , 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; $\eta = S_k/\epsilon$; $\hat{\nu} = \mu_{eff}/\mu$; μ — коефіцієнт ламінарної в'язкості.

Для нестационарних розрахунків процесів у 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.

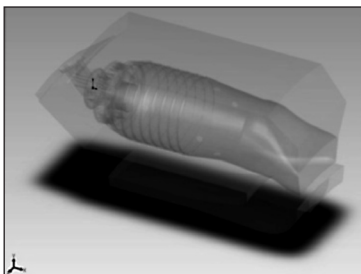
Для числового розв'язання системи диференціальних рівнянь, що описує фізико-хімічні процеси в низькоемісійних камерах згоряння ГТД, використано метод контрольного об'єму, реалізований у програмних комплексах ANSYS Fluent і ANSYS CFX.

Верифікація запропонованої математичної моделі проведена на базі експериментальних даних, отриманих при випробуваннях зворотно-вихрової камери згоряння «Торнадо» [8]. Дослі-

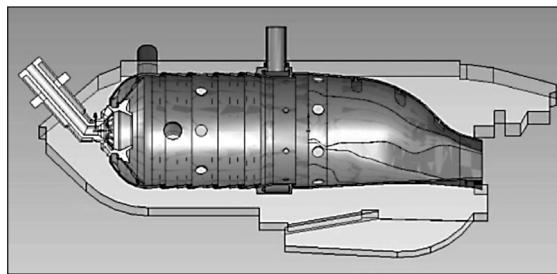
дження аеродинамічної структури потоку в низькоемісійній зворотно-вихрової камері із застосуванням тривимірної моделі в умовах неізотермічності та ізотермічності потоків підтвердили достовірність математичної моделі, її адекватність фізичним процесам, якісні й кількісні узгодження експериментальних і розрахункових характеристик.

Результати числових експериментів з вдосконалення екологічної безпеки камер згоряння. Проведено моделювання процесів горіння в камерах згоряння двох типів: камері ГТД потужністю 25 МВт (рис. 1, а), у якій реалізовано принцип сухого горіння частково перемішаної бідної суміші, та камері газотурбінної установки типу «Водолій» потужністю 16 МВт з впорскуванням екологічної та енергетичної водяної пари (див. рис. 1, б).

Результати моделювання показують, що з п'яти розглянутих кінетичних схем горіння метану для описаних типів камер згоряння можна рекомендувати триреакційний 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, 3). П'ятиреакційний механізм, що додатково враховує утворення водню, може бути використаний не тільки для визначення температур, але



а)



б)

Рис. 1. Тривимірні моделі камер згоряння

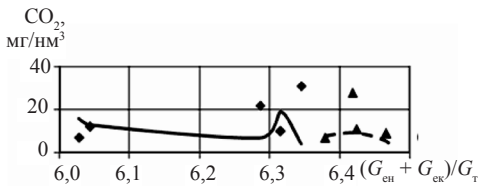


Рис. 2. Викиди CO для газотурбінної установки «Водолій»: ♦, ▲ — експерименти з подаченою екологічної та енергетичної й екологічної пари; —, - - - — розрахунки з триреакційним механізмом

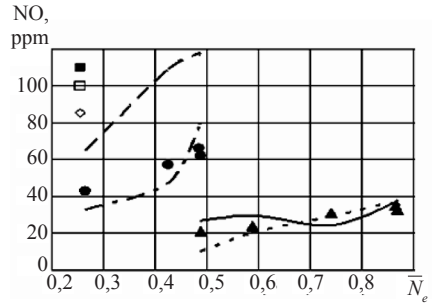


Рис. 3. Порівняння емісії NO у камері згоряння газотурбінної установки «Водолій»: ■, ●, ▲ — експеримент; □, —, — — розрахунки з двореакційним механізмом; ◇, - - -, - - - — розрахунки з триреакційним механізмом

й прогнозування емісії CO і NO_x (рис. 4, 5) у камерах згоряння, в яких реалізований принцип сухого горіння частково перемішаної бідної суміші й максимальна температура в яких не перевищує 1900 К.

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 з 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; $k_1 = 2 \cdot 10^{14} e^{70,3/RT}$, $k_3 = 1,568 \cdot 10^{13} e^{3,52/RT}$ — відповідно константи швидкості прямої та зворотної реакцій $H + O_2 = OH + O$; $k_2 = 1 \cdot 10^8 T^{1,6} e^{13,8/RT}$, $k_4 = 4,312 \cdot 10^8 T^{1,6} e^{76,46/RT}$ — константи швидкості прямої та зворотної реакцій $OH + H_2 = H + H_2O$ відповідно.

На підставі узагальнення розрахункових даних з поліпшення температурних полів і екологічних характеристик

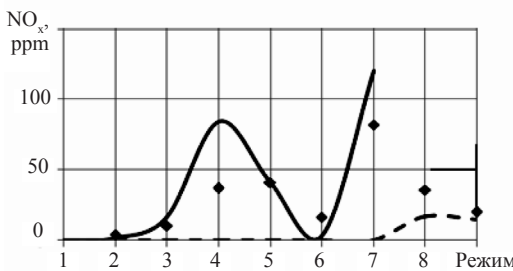


Рис. 4. Емісія оксидів азоту для газотурбінного двигуна потужністю 25 МВт: ♦ — експеримент; - - - — розрахунок з використанням п'ятиреакційного механізму та відомої залежності для обчислення [O]; — — — розрахунок з використанням запропонованої формули

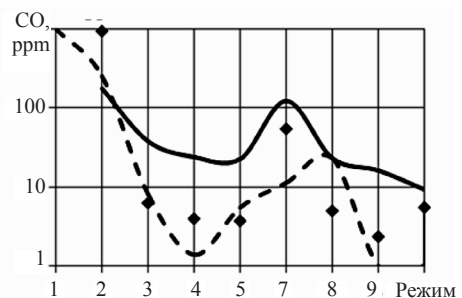


Рис. 5. Викиди оксиду вуглецю для газотурбінної установки потужністю 25 МВт за режимами: ♦ — експеримент; - - - — розрахунок з триреакційним механізмом; — — — розрахунок з п'ятиреакційним механізмом

камер згоряння ГТД потужністю 25 МВт та газотурбінної установки 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 19,0 до 8,6% при збереженні коефіцієнта повноти згоряння палива. Запропоновані конструктивні зміни жарової труби камери згоряння газотурбінної установки «Водолій» з впорскуванням водяної пари дозволять зменшити розрахункові викиди оксидів азоту з 33 до 10 ppm, оксиду вуглецю з 12 до 4 ppm і розрахункову усереднену радіальну нерівномірність температурного поля на виході з 8,0 до 3,8%. З огляду на обмеження та припущення математичної моделі на двигунах можна прогнозувати зниження викидів оксиду азоту в 1,5–2,0 рази зі збереженням емісії CO, зменшення втрат повного тиску на 7% (відносних) для ГТД потужністю 25 МВт і зниження викидів оксиду азоту в 1,3–1,5 рази і CO на 20...25% для газотурбінної установки 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. Запропоновано і верифіковано ефективні кінетичні механізми окиснення газоподібного палива, що враховують часткове попереднє перемішування палива з повітрям, а також впорскування екологічної та енергетичної водяної пари і дозволяють коректно моделювати розподіл температур і концентрацій хімічних компонентів у низькоемісійних камерах згоряння ГТД.

3. На основі результатів математичного моделювання проаналізовано основні недоліки двох конструктивних типів низькоемісійних камер згоряння і подано практичні рекомендації з поліпшення температурного режиму й екологічної безпеки камер згоряння ГТД потужністю 25 МВт і газотурбінної установки типу «Водолій» потужністю 16 МВт із впорскуванням екологічної й енергетичної водяної пари виробництва ДП Науково-виробничий комплекс газотурбобудування «Зоря»–«Машпроект» (м. Николаїв).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] **Варнатц, Ю.** Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ [Текст] : [пер. с англ. Г. Л. Агафонова] / Ю. Варнатц, У. Маас, Р. Диббл ; под ред. П. А. Власова. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. — 352 с.
- [2] **Лефевр, А.** Процессы в камерах сгорания ГТД [Текст] : [пер. с англ.] / А. Лефевр. — М. : Мир, 1986. — 566 с.
- [3] **Постников, А. М.** Снижение оксидов азота в выхлопных газах ГТУ [Текст] / А. М. Постников ; под ред. д-ра техн. наук, проф. Е. А. Гриценко. — Самара : Изд-во Самарского научного центра РАН, 2002. — 286 с.

- [4] **Романовський, Г.Ф.** Камери згоряння суднових газотурбінних двигунів [Текст] : навч. посіб. / Г. Ф. Романовський, С. І. Сербін. — Миколаїв : УДМТУ, 2000. — 259 с.
- [5] **Сербін, С.И.** Исследование структуры течения во фронтном устройстве камеры сгорания газотурбинного двигателя мощностью 25 МВт [Текст] / С.И. Сербин, А. Б. Мостипаненко, В. В. Вилкул // *Авиационно-космическая техника и технология*. — Харьков : ХАИ, 2005. — № 8 (24). — С. 146–149.
- [6] **Сербін, С. І.** Числове моделювання процесів горіння в експериментальному відсіку гібридної камери згоряння ГТД потужністю 25 МВт [Текст] / С.І. Сербін, Г.Б. Мостіпаненко // *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»* : зб. наук. праць. — Тематичний вип. «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування». — Харків : НТУ «ХПІ», 2006. — № 5. — С. 59–66.
- [7] **Христич, В.А.** Газотурбинные двигатели и защита окружающей среды [Текст] / В. А. Христич, А. Г. Тумановский. — К. : Техника, 1983. — 144 с.
- [8] **Matveev, I.** CFD Calculations of Reverse Vortex Reactive Flows [Text] / I. Matveev, S. Serbin, A. Mostipanenko // 3-rd Int. Workshop and Exhibition on Plasma Assisted Combustion (IWEPAC). — Falls Church, USA, 2007. — P. 70–72.
- [9] **NO_x 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** [Text] / A. Andreini, B. Facchini, L. Mangani, A. Asti, G. Ceccherini, R. Modi // ASME. — 2005. — GT2005-68364. — 13 p.
- [10] **Willis, J. D.** Industrial RB211 DLE Gas Turbine Combustion Update [Text] / J. D. Willis, A. J. Moran // ASME. — 2000. — GT2000-109. — 6 p.