

УДК 662.7;662.73;662.74;662.8

МОДЕЛЮВАННЯ ГОРІННЯ ПРОДУКТІВ ГАЗИФІКАЦІЇ ТВЕРДОГО ПАЛИВА В КИПЛЯЧОМУ ШАРІ В НАДШАРОВОМУ ПРОСТОРІ З ВИХРОВИМ ДОПАЛЮВАННЯМ

Кобзар С.Г., канд. техн. наук, Коваленко Г.В., канд. техн. наук, Халатов А.А., академік НАН України

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. М. Капніст, 2 а, Київ, 03680, Україна

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2021.9>

Вихрове допалювання є перспективним методом вдосконалення процесів спалювання твердих палив.

Метою роботи є верифікація програмного комплексу ANSYS CFX для розрахунку вихрової камери опалювання циклонно-шарових топків. В результаті проведеного дослідження визначено, що для моделювання горіння продуктів газифікації твердого палива в киплячому шарі в надшаровому просторі з вихровим допалюванням доцільно застосовувати двостадійний механізм окислення метану, доповнений реакцією окислення водню. Визначені параметри моделі дисипації вихорів які дозволяють отримати результати по температурним полям та полям концентрацій основних компонентів з задовільною точністю, як якісно так і кількісно.

Вихровое дожигания является перспективным методом совершенствования процессов сжигания твердого топлива.

Целью работы является верификация программного комплекса ANSYS CFX для расчета вихровой камеры дожигания циклонно-слоевых топков. В результате проведенного исследования установлено, что для моделирования горения продуктов газификации твердого топлива в кипящем слое в надслоевом пространстве с вихревым дожиганием целесообразно применять двухстадийный механизм окисления метана, дополнен реакцией окисления водорода. Определены параметры модели диссипации вихрей которые позволяют получить результаты по температурным полям и полям концентраций основных компонентов с удовлетворительной точностью, как качественно так и количественно.

The swirl afterburning is a promising method to improve the combustion of solid fuels.

The aim of the work is to verify the ANSYS CFX software package for calculation of the afterburning vortex chamber of the cyclone-ball furnaces. As a result, of this study it was determined that to simulate the combustion of the solid fuel gasification products of in the fluidized bed in an upper bed space with vortex afterburning, it is advisable to use a two-stage mechanism of methane oxidation, along with the hydrogen oxidation reaction. The parameters of the eddy dissipation model are determined, which allow obtain results on the temperature and concentration fields of basic components with acceptable accuracy, both qualitatively and quantitatively.

Бібл. 6, табл. 3, рис. 6.

Ключові слова: теплогенератор, низькосортне паливо, сумішеві палива, пелети, спалювання у шарі, двостадійне спалювання.

A_{EDC} – константа моделі;
 B_{EDC} – константа моделі;
 D – діаметр камери допалювання;
 d_{out} – діаметр отвору в діафрагмі;
 $Fuel$ – масова концентрація палива;
 G_2 – масова витрата вторинного повітря;
 h_b – висота шару пелет;
 $Oxid$ – масова концентрація окислювача;

$Product$ – масова концентрація продукту;
 s – стехіометричне відношення паливо/окислювач
 Q_1 – витрата первинного повітря;
 Q_2 – витрата вторинного повітря;
 q_4 – частка механічного недопалювання;
 q_w – тепловий потік на стінці;
 T_l – температура на нижній границі киплячого шару;
 α – коефіцієнт надлишку повітря ;

Україна намагається зрівнятися з європейськими країнами по енергоефективності і екологічній безпеці. Одним з аспектів на цьому шляху є використання твердих біопалив. Для них зараз застосовують котли з нерухомим шаром палива (НШ), рідше котли з киплячим шаром (КШ).

Основні недоліки котлів з (НШ) – підвищені коефіцієнти надлишку повітря ($1,4 < \alpha < 1,7$), механічне недопалювання ($2\% < q_4 < 4\%$), емісія NOx. Потужність шарових топків не перевищує 20...30 МВт. Можливе

покращення роботи топки, з нерухомим шаром палива (НШ) при застосуванні вихрового допалювання. Відомі топки з поєднанням шарового і вихрового спалювання «Wellons» (США), «Bertch» (Австрія), «Kablitz» (Німеччина), ОАО «БиКЗ» (РФ). Потужність сучасних вихрових топкових пристроїв 3...150 МВт. Переваги вихрових топків – добре перемішування палива з повітрям, що дозволяє зменшити коефіцієнт надлишку повітря до 1,1...1,2 і знизити емісію оксиду вуглецю і оксидів азоту.

Метою дослідження є верифікація програмного комплексу ANSYS CFX для розрахунку вихрової камери допалювання циклонно-шарових топків.

В якості об'єкту дослідження була вибрана експериментальна установка білоруських дослідників з ІТМО ім. А.В. Ликова БИ-1М з циклонно-шаровою топкою [1] тепловою потужністю 25 кВт, схема якої показана на рис. 1.

Паливо в вигляді шару пелет висотою h_b розміщено на нерухомій решітці (гратці). Під решітку підводиться первинне повітря з витратою Q_1 . Вторинне повітря з витратою Q_2 надходить вище верхнього краю твердого палива через систему сопел (рис. 1). Між нижньою частиною топки і камерою допалювання встановлено діафрагму з зовнішнім діаметром D і внутрішнім отвором d_{out} . Продукти згоряння виходять з камери через патрубок в верхньому торці камери. В таблиці 1 наведено основні характеристики палива.

Комп'ютерна модель та розрахункова сітка. Комп'ютерна модель об'єкту дослідження приведена на рис. 2. Для виконання CFD-моделювання було використано неструктуровану розрахункову сітку, побудовану за допомогою сіткового генератора ANSYS CFX Mesh. Вона являє собою групу те-

траедральних елементів в середині розрахункової області з призматичними елементами в областях згущення розрахункової сітки біля стінок моделі. Були проведені попередні дослідження щодо впливу на якість сітки способу задавання згущення біля твердих стінок. В результаті проведеного аналізу було виявлено, що оптимальним способом задавання згущення є метод Товщини першого шару зі значенням 0,1 мм. Максимальне число вузлів згущення складало 15 з параметром зростання 1,2. Загальний розмір розрахункової сітки складав 923 тис. вузлів.

Математична модель та граничні умови. Осереднені згідно Рейнольдса рівняння Нав'є-Стокса розв'язувались для в'язкого теплопровідного газу в стаціонарній постановці з використанням в якості моделі теплообміну повного рівняння збереження енергії. Для замкнення рівняння руху використовувалася $RNG\ k-\varepsilon$ модель турбулентності. Щільність суміші газів розраховувалася за допомогою закону ідеального газу для суміші газів.

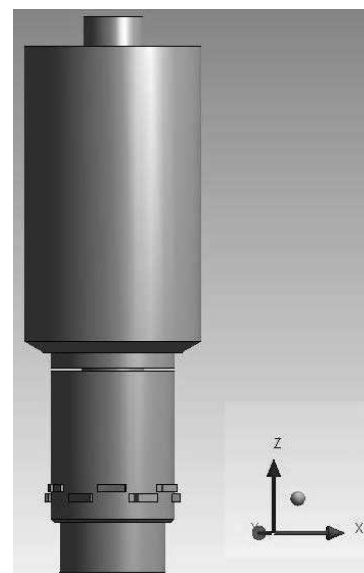
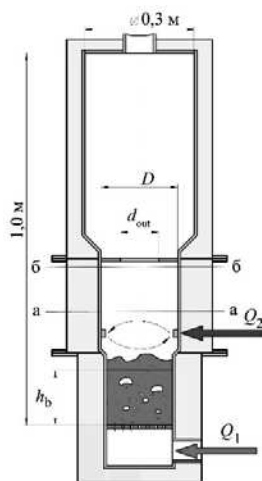


Рис. 1. Схема експериментальної установки БИ-1М

Рис. 2. Комп'ютерна модель об'єкту дослідження

Таблиця 1. Основні характеристики палива

Паливо	Розміри, $D \times L$, мм	Вологість на робочу масу, W^p , %	Зольність на робочу масу, A^p , %	Нижча теплота згоряння, Q_p^p , МДж/кг
Деревні пелети	6×(10 – 20)	10	0,5 – 1	16,7

Елементарний склад деревних пелет (на робочу масу) був наступним: $C^p=45,2\%$, $H^p=5,5\%$, $S^p=0\%$, $O^p=37,5\%$, $N^p=0,5\%$, $A^p=1,1\%$, $W^p=10,2\%$

Вплив гравітації враховувався шляхом завдання сили земного тяжіння в напрямку протилежному направленню осі Z. Радіаційний теплообмін моделювався за допомогою моделі Дискретного Переносу (*Discrete Transfer*).

Граничні умови. Для тестування використовувалися результати експериментальних досліджень [1] для теплового навантаження установки 25 кВт. В цьому дослідженні подача вторинного повітря була виконана через половину сопел вторинного повітря. Робочі сопла були розташовані у шаховому порядку, масова витрата крізь них складала $G_2 = 0,00656$ кг/с ($T_2 = 30$ °C). Тестові розрахунки були проведені для випадку, коли в подачі вторинного повітря в камеру допалювання були задіяні тільки 6 з 12 сопел – по три в кожному ряді.

На стінках, які обмежують розрахункову область, задавалась шерхність – 0,1 мм, температура стінок приймалась – 300 °C їх ступінь чорноти $\varepsilon_w = 0,85$. У вихідному отворі камери задавався надлишковий статичний тиск рівний нулю ($P_{st,out} = 0$). На стінках, що утворюють звування, тепловий потік приймався рівним нулю ($q_w = 0$).

На нижній границі розрахункової області, яка є межею киплячого шару задавалась масова витрата продуктів газифікації $G_f = 0,00496$ кг/с, при температурі $T_f = 835$ °C.

Склад продуктів газифікації на виході з киплячого шару визначався в відповідності з рівноважною стехіометричною моделлю газифікації палива в КШ [2], і враховувалось байпасування частини повітря донного вдування (20...35 %) з бульбашками [1]. Склад продуктів газифікації [1] з киплячого шару наведено в таблиці 2.

Визначення середньої швидкості протікання реакції та механізм хімічної кінетики

Беручи до уваги склад продуктів газифікації, що потрапляють до циклонної топки з киплячого шару, до

розгляду було взято два механізми хімічної кінетики: двостадійний механізм окислення метану, доповнений реакцією окислення водню та тристадійний механізм окислення метану [3,4].



та



Для визначення середньої швидкості протікання хімічних реакцій 1 – 6 використовувалася модель дисипації вихорів Магнусена [5]. Згідно цієї моделі, швидкість реакції визначається за формулою:

$$K_{EDC} = A_{EDC} \frac{\varepsilon}{k} \rho \cdot \min\left\{[Fuel], \frac{[Oxid]}{s}, B_{EDC} \frac{1}{1+s} [Product]\right\}. \quad (7)$$

де $[Fuel]$, $[Oxid]$, $[Product]$ – масові концентрації палива, окислювача та продукту, s – стехіометричне відношення реакції паливо/окислювач; A_{EDC} та B_{EDC} – константи моделі. Завдання тестових розрахунків полягає в адаптації констант моделі A_{EDC} та B_{EDC} до умов спалювання продуктів газифікації в циклонній камері згоряння [6].

Для визначення концентрації оксидів азоту використовувалися стандартні термічний та швидкий механізми утворення оксиду азоту. Швидкість утворення розраховувалася згідно рекомендацій за допомогою температури, що розрахована за допомогою функції щільності вірогідності [6].

Таблиця 2. Склад газів газифікації на виході з кип'ячого шару

Компонента суміші	Концентрація, об. %	Масова концентрація, кг/кг
CO	17,8	0,2011
CO ₂	8,8	0,1562
H ₂	14,6	0,0118
H ₂ O	7,7	0,0559
CH ₄	1,2	0,0077
N ₂	47,7	0,5701
O ₂	2,1	0,0271

Результати тестування. Отримані результати розрахунків порівнювалися з результатами експериментальних досліджень [1].

Результати тестових розрахунків показали, що краще узгодження результатів комп'ютерного моделювання були отримані для механізму хімічної кінетики (1) – (3) при наступних параметрах моделі Дисипації вихорів окремо для кожного рівняння механізму:

Додатково використовувалися наступні параметри моделі: *Mixing rate limit* = 2500 1/c; *Chemical time scale* = $5 \cdot 10^{-4}$ с. З цими параметрами моделі результати добре узгоджуються з експериментом якісно та задовільно кількісно.

Тестування тристадійного механізму (4) – (6) показало незадовільне узгодження експериментальних та розрахункових результатів з температури тому для подальшого дослідження його використання недоцільно.

На рис. 3 наведено розподіл температурного поля в осьовому перерізі комп'ютерної моделі газофазної частини топки. Внаслідок подачі вторинного повітря крізь розташовані тангенційно до бокової поверхні надшарової частини топки утворюється вихровий рух окислювача та продуктів газифікації твердого палива в киплячому шарі. Наявність вихрового руху в топці призводить до симетричного відносно осі обертання (Z) температурного поля. В просторі між кип'ячим шаром та діафрагмою вигляд температурного поля обумовлений процесом горіння у вихровому потоці, коли кисень з периферії поступово витрачається на окислення продуктів газифікації твердого палива. При проході діафрагми продукти газифікації, що не згоріли миттєво змішуються з киснем. Це призводить до горіння залишків палива у відносно невеликому об'ємі камери допалення з подальшим охолодження продуктів горіння в наслідок конвективного та радіаційного теплообміном між продуктами згорання та стінками камери допалення.

Результати порівняння експериментів та розрахунків температури та концентрацій продуктів згорання для перерізу $z = 0,44$ м від газорозподільчої

решітки наведені на рисунках 4 - 6. Початок відліку осі абсцис на цих рисунках відповідає осі симетрії надшарової циклонної камери згорання. Результати комп'ютерного моделювання та їх порівняння з результатами експериментів дають змогу зробити висновок, що з визначеними в результаті тестування параметрами моделі Дисипації вихорів (таблиця 2) пакет прикладних програм дозволяє отримати результати по температурним полям та полям концентрацій основних компонентів з задовільною точністю, як якісно так і кількісно.

Інтегральні характеристики. На виході з моделі експериментальної установки були розраховані середня температура, концентрація оксиду вуглецю та оксидів азоту. Їхні значення в порівнянні з результатами експериментів наведені в таблиці 3.

Таблиця 3. Порівняння інтегральних характеристик

Параметр	Розрахунок	Експеримент [1]
Середня температура на виході, К	940	990...1030
Концентрація оксиду вуглецю, мг/нм ³	55	50...150
Концентрація оксиду азоту, мг/нм ³	3,5	180...280

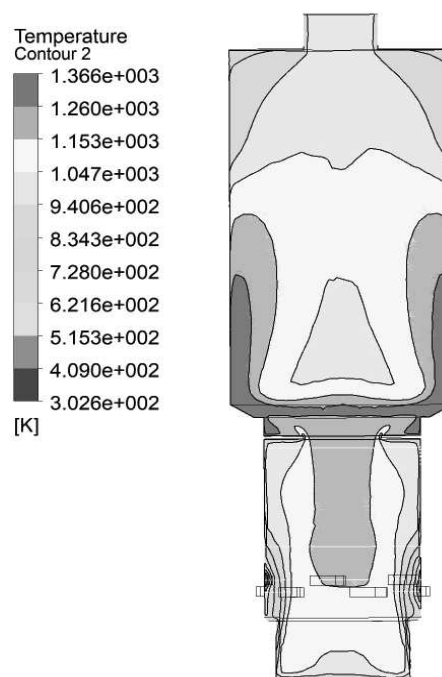


Рис. 3. Розподіл температури в осьовому перерізі топки

Таблиця 2. Параметри моделі Дисипації вихорів

Реакція	A_{EDC}	B_{EDC}
$2CO + O_2 = 2CO_2$	2	0,02
$2H_2 + O_2 = 2H_2O$	4	0
$CH_4 + 2O_2 = 2H_2O + CO_2$	0,4	0,01

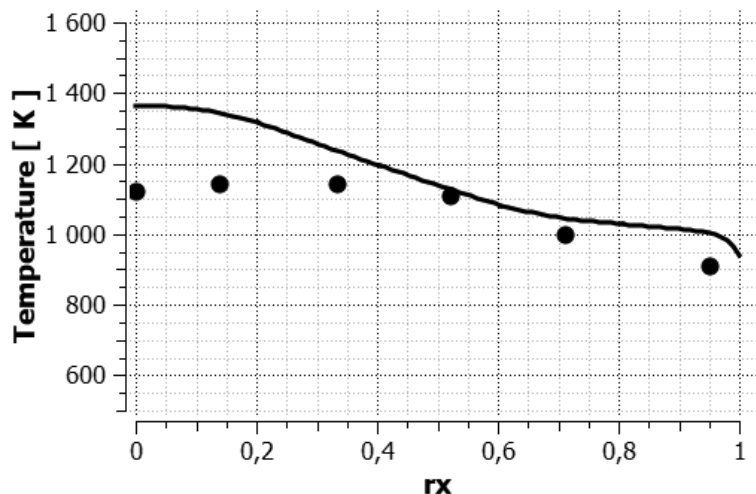


Рис. 4. Розподіл температури в циклонній камері в перетині $z=0,44$ м: лінія розрахунок; точки – експеримент [1]

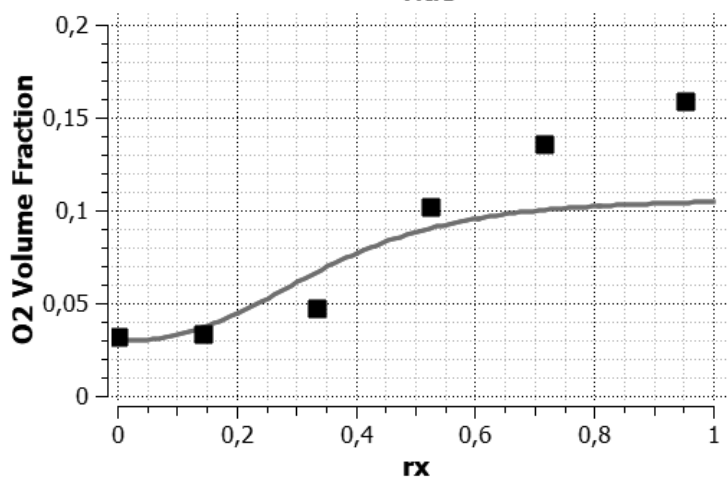


Рис. 5. Розподіл кисню в циклонній камері в перетині $z=0,44$ м: лінія розрахунок; точки – експеримент [1]

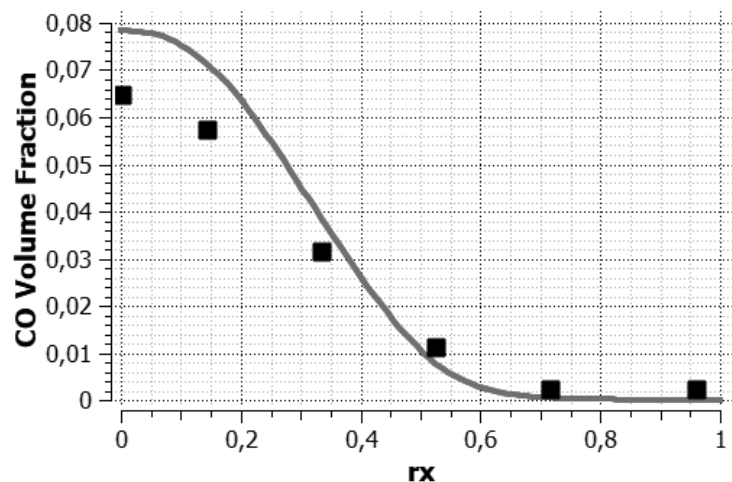


Рис.6. Розподіл оксиду вуглецю в циклонній камері в перетині $z=0,44$ м: лінія – розрахунок; точки – експеримент[1]

Результати (табл. 3) дають змогу зробити висновки про добру точність програмного комплексу з визначеними при тестуванні параметрами моделі Дисипації вихорів при розрахунку температури та концентрації оксиду вуглецю на виході з камери допалювання.

Наявні моделі розрахунку оксиду азоту дають незадовільні результати. По-перше це пов'язано з тим, що склад продуктів газифікації на виході з киплячого шару, що в даному дослідженні визначався в відповідності з рівноважною стехіометричною моделлю газифікації палива в КШ [2], не враховує утворення оксидів азоту, в першу чергу за паливним механізмом з азоту палива, тому оцінка впливу зміни робочих параметрів установки на емісію оксидів азоту необхідно оцінювати відносним способом. З іншого боку мала кількість оксидів азоту, що утворилася при вихровому допалюванні продуктів газифікації твердого палива у КШ, свідчить про екологічність даного способу спалювання.

ВИСНОВКИ

1. В результаті проведеного дослідження визначено, що для моделювання горіння продуктів газифікації твердого палива в киплячому шарі в надшаровому просторі з вихровим допалюванням доцільно застосовувати двостадійний механізм окислення метану, доповнений реакцією окислення водню.

2. Визначені параметри моделі Дисипації вихорів які дозволяють отримати результати по температурним полям та полям концентрацій основних компонентів з задовільною точністю, як якісно так і кількісно.

Робота виконувалась за Договором № 02-04-20 «Фізико-хімічні процеси спалювання гранульованої біомаси з комбінацією зернистого шару і вихрового допалювання» в рамках спільного конкурсу НАН України та НАН Білорусі 2020 р.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Пицуха Е. А.* Научные основы создания высокоэффективных циклонно-слоевых топочных устройств для котлов, работающих на твердом биотопливе: автореф. Дис. ... д-ра тех. наук: 05.14.04/Пицуха Евгений Александрович; Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси. – Минск, 2019. – 46 с.
2. *Basu P.* Biomass gasification and pyrolysis: Practical design and theory. Elsevier, 2010. 364 p.
3. *Westbrook, C. K., Dryer, F. L.* Simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Flames, Combustion Science and Technology, 1981, Vol. 27, pp. 31-43.
4. *Bartok, W., and Sarofim, A. F.* (Eds.), Fossil Fuel Combustion—A Source Book, John Wiley & Sons, New York, 1991.
5. *Magnussen, B.F., and Hjertager, B.W.* On the structure of turbulence and a generalized eddy dissipation concept for chemical reaction in turbulent flow//19th AIAA Aerospace Meeting, 1981, St. Louis, USA.
6. *Chui, E. H., and Hughes, P. M. J.* Validation of NO_x and NO_x Precursor Predictions in Coal Flames", Combust. Sci. and Tech., 1996, Vol 119, pp. 51-75.

THE COMPUTER SIMULATION OF THE COMBUSTION OF THE GASIFICATION PRODUCTS IN FLUIDIZED BED OF SOLID FUEL IN UPPER BED LAYER WITH VORTEX BURNING

Kobzar S.G., Kovalenko G.V., Khalatov A.A.

*Institute of Engineering Thermophysics, NAS of Ukraine,
ul. Marii Kapnist, 2a, Kiev, 03057, Ukraine*

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2021.9>

The swirl afterburning is a promising method of improving the combustion of solid fuels.

The aim of the work is to verify the ANSYS CFX software package for calculating the vortex chamber of cyclone-ball furnaces afterburning.

As a result of the study it was determined that to simulate the combustion of gasification products of solid fuel in a fluidized bed in a upper bed space with vortex afterburning, it is advisable to use a two-stage mechanism of methane oxidation, supplemented by hydrogen oxidation reaction. The parameters of the Eddy Dissipation model are determined, which allow obtaining results on temperature fields and fields of concentrations of the main components with satisfactory accuracy, both qualitatively and quantitatively.

References 6, table 6, figures 3.

Key words: heat generator, low-grade fuel; mixed fuels; pellets; burning in a layer; two-stage combustion.

1. *PitsukhaYa. A.* Scientific basis for creation highly-efficient cyclone-bed furnaces for boilers using solid biofuel: Doctor of tech. Sci. Thesis: 05.14.04/Pitsukha Yauheni Alexandrovich; The A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus. – Minsk, 2019. – 46 c.

2. *Basu P.* Biomass gasification and pyrolysis: Practical design and theory. Elsevier, 2010. 364 p.

3. *Westbrook, C. K., Dryer, F. L.* Simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Flames, Combustion Science and Technology, 1981, Vol. 27, pp. 31-43.

4. *Bartok, W., and Sarofim, A. F.* (Eds.), Fossil Fuel Combustion – Source Book, John Wiley & Sons, New York, 1991.

5. *Magnussen, B.F., and Hjertager, B.W.* On the structure of turbulence and a generalized eddy dissipation concept for chemical reaction in turbulent flow//19th AIAA Aerospace Meeting, 1981, St. Louis, USA.

6. *Chui, E. H., and Hughes, P. M. J.* Validation of NOx and NOx Precursor Predictions in Coal Flames", Combust. Sci. and Tech., 1996, Vol 119, pp. 51-75.

Отримано 28.02.2021

Received 28.02.2021