

УДК 662.7;662.73;662.74;662.8

МОДЕЛЮВАННЯ ВИХРОВОГО ДОПАЛЮВАННЯ ПРОДУКТІВ ГАЗИФІКАЦІЇ БІОМАСИ В ТОПЦІ З КИПЛЯЧИМ ШАРОМ

Кобзар С.Г.¹, канд. техн. наук, Борисов І.І.¹, канд. техн. наук, Халатов А.А.¹, академік НАН України,
Теплицький Ю. С.², доктор техн. наук, Піщуха Є.О.², доктор техн. наук

¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. М. Капніст, 2 а, Київ, 03680, Україна

²Інститут тепло- і масообміну НАН Білорусі ім. А. В. Ликова, вул. П. Бровки, 15, Мінськ, 220072, Білорусь

<https://doi.org/10.31472/tpe.4.2021.10>

Проведено комп'ютерне моделювання допалювання продуктів газифікації біомаси у топці з киплячим шаром при вихровій подачі вторинного повітря. Отримані поля швидкостей, температур, кінетичної енергії турбулентності. Визначено вплив підігріву вторинного повітря на екологічні характеристики викидних газів. В результаті підігріву зростає окружна швидкість вторинного повітря, що призводить до інтенсифікації перемішування і збільшення повноти згоряння. Моделювання показало, що підігрів вторинного повітря знижує концентрацію діоксиду вуглецю на виході з установки.

Выполнено компьютерное моделирование дожигания продуктов газификации биомассы в топке с кипящим слоем при вихревой подаче вторичного воздуха. Получены поля скорости, температуры, кинетической энергии турбулентности. Определено влияние подогрева вторичного воздуха на экологические характеристики сбросных газов. В результате подогрева увеличивается окружная скорость вторичного воздуха, что приводит к интенсификации смешения и увеличению полноты сжигания. Моделирование показало, что подогрев вторичного воздуха снижает концентрацию монооксида углерода на выходе.

CFD modelling of the afterburning of biomass gasification products in a fluidized bed furnace with a vortex supply of secondary air has been performed. The fields of velocity, temperature, kinetic energy of turbulence, are obtained. The effect of secondary air heating on the ecological characteristics of flue gases has been determined. As a result of heating, the peripheral velocity of the secondary air increases, which leads to an intensification of mixing and an increase in the completeness of combustion. Simulation has shown that heating the secondary air reduces the carbon monoxide concentration at the outlet.

Бібл. 7, рис. 8, табл. 2.

Ключові слова: топка з киплячим шаром, біомаса; вихрове допалювання, турбулентне змішування, екологічні характеристики.

D_1 – діаметр первинної камери;
 D_2 – діаметр камери допалювання;
 d_1 – діаметр отвору в діафрагмі;
 d_2 – діаметр вихідного отвору;
 G_1 – масова витрата продуктів газифікації;

G_2 – масова витрата вторинного повітря;
 T – температура;
 v – тангенційна швидкість;
 ke – кінетична енергія турбулентності;
 c – концентрація.

Вступ

Застосування вихрових потоків є перспективним способом удосконалення процесів горіння, воно дозволяє суттєво підвищити ефективність змішування в об'ємі топки, що призводить до збільшення повноти згоряння та зниження шкідливих викидів. Незважаючи на значну кількість робіт в даній області, використання вихрового руху для інтенсифікації горіння залишається актуальним в різноманітних технічних застосуваннях, в тому числі і для допалювання продуктів газифікації біомаси.

В роботі [1] показано, що подача вторинного повітря у вигляді закрученого струменя призводить до значного зменшення формування твердих аерозолів (для частинок розміром 100 мкм – у 100 разів. Дослідження циклонної камери згоряння, виконані в [2], показа-

ли, що у вихровій камері, разом із потенційним потоком, утворюється осьовий вихор з профілем окружної швидкості, близьким до закону твердотілого обертання. На границі двох вихорів генерується високий рівень турбулентності потоку. В роботах [3,4] показано, що використання вторинної вихрової камери згоряння призводить до якісного спалювання та суттєвого зменшення концентрації шкідливих речовин у викидних газах.

На даний час на ринку представлено ряд топок різної потужності (від 3 до 150 Мвт) з поєднанням шарового і вихрового спалювання: «Wellons» (США), «Bertch» (Австрія), «Kablitz» (Німеччина), ОАО «БиКЗ» (РФ). У порівнянні з аналогічним традиційним устаткуванням, в установках з вихровим допалюванням за рахунок більш якісного перемішування продуктів газифікації палива з повітрям вдалося зменшити величину коефіцієнта над-

лишку повітря на 25%, а також значно знизити емісію оксиду вуглецю та оксидів азоту.

В даній роботі в якості об'єкту дослідження була вибрана експериментальна установка білоруських дослідників з ІТМО ім. А.В. Ликова БИ-1М з циклонно-шаровою топкою [5] тепловою потужністю 25 кВт.

Серед різних факторів, які впливають на характеристики вихрових топок, одним із ключових є інтенсивність вихрового руху. Одним із способів підвищення тангенційної швидкості подачі вторинного повітря є збільшення його вхідної температури.

Метою роботи є комп'ютерне моделювання допалювання продуктів газифікації біомаси при вихровій подачі вторинного повітря та визначення впливу його підігріву на поля швидкостей і температур та екологічні характеристики топки з киплячим шаром.

Об'єкт дослідження

В якості об'єкта дослідження було вибрано установку ІТМО НАН Білорусі ім. А.В. Ликова. Схему установки наведено на рис. 1.

Вона представляє собою двостадійну камеру спалювання біомаси: на першій стадії відбувається газифікація у киплячому шарі, а на другій – вихро-

ве допалення у вторинній камері згоряння. Паливо в вигляді шару пелет, розміщено на нерухомій решітці (гратці). Під решітку підводиться первинне повітря. У первинній камері діаметром $D_1 = 210$ мм відбувається газифікація палива і продукти газифікації виходять з киплячого шару з масовою витратою G_1 . Вторинне повітря з масовою витратою G_2 надходить вище верхнього краю твердого палива тангенційно через систему сопел, його температура варіювалась в діапазоні від 30°C до 300°C. Між нижньою частиною топки і вторинною камерою (камерою допалення) встановлено діафрагму з отвором $d_1 = 105$ мм, через яку потік поступає у вторинну камеру діаметром $D_2 = 300$ мм. Продукти згоряння виходять зі вторинної камери через патрубок діаметром $d_2 = 100$ мм в її верхньому торці. Параметри продуктів газифікації задавались виходячи з експериментальних даних [5].

Верифікацію програмного комплексу ANSYS CFX для розрахунку вихрової камери опалювання циклонно-шарових топок виконано в роботі [6]. В результаті верифікації було визначено, що для моделювання горіння продуктів газифікації твердого палива в киплячому шарі в надшаровому просторі з вихровим допалюванням доцільно застосовувати двостадійний механізм

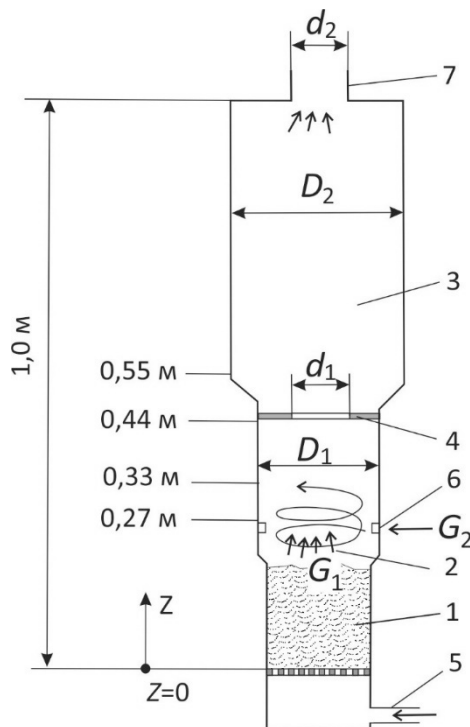


Рис. 1. Схема експериментальної установки БИ-1М:

- 1 – киплячий шар; 2 – продукти газифікації у надшаровому просторі; 3 – вторинна камера згоряння (камера допалення); 4 – діафрагма; 5 – патрубок подачі первинного повітря; 6 – сопла подачі вторинного повітря; 7 – вихідний патрубок

окислення метану, доповнений реакцією окислення водню. Були 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.

Комп'ютерна модель та розрахункова сітка

Комп'ютерну модель об'єкту дослідження наведено на рис. 2 Для виконання CFD-моделювання було використано неструктуровану розрахункову сітку, побудовану за допомогою сіткового генератора *ANSYS CFX Mesh*. Вона являє собою групу тетраедральних елементів всередині 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 (рис.3). Загальний розмір розрахункової сітки складав 923 тис. вузлів.

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-ε* модель турбулентності. Щільність суміші газів розраховувалася за допомогою закону ідеального газу для суміші газів.

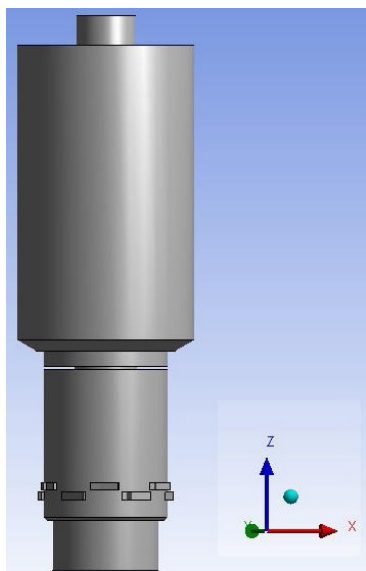


Рис. 2. Комп'ютерна модель
Математична модель та граничні умови

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

Дослідження було виконано для теплового навантаження установки 25 кВт. Вторинне повітря подавалось тангенційно (рис. 1) через сопла, розташовані на периферії первинної камери. Масова витрата вторинного повітря складала $G_2 = 6,56$ г/с. Температура вторинного повітря T_2 змінювалась в інтервалі від 30°C до 300°C.

На стінках, які обмежують розрахункову область, задавалась шорсткість 0,1 мм, температура стінок приймалась постійною та рівною 300°C (виходячи з умов експериментів [5]), ступінь чорноти поверхні $\varepsilon_w = 0,85$. Задавався нульовий надлишковий статичний тиск у вихідному отворі камери ($P_{st.out} = 0$). На стінках, що утворюють звуження, тепловий потік приймався рівним нулю ($q_w = 0$).

На нижній границі розрахункової області, яка є межею киплячого шару, задавались наступні параметри потоку продуктів газифікації (виходячи із експериментальних даних [5]): масова витрата продуктів газифікації $G_1 = 4,96$ г/с, температура $T_1 = 835^\circ\text{C}$.

Склад продуктів газифікації на виході з киплячого шару (табл. 1) визначався в відповідності з рівноважною стехіометричною моделлю газифікації палива в киплячому шарі [7], з урахуванням байпасування частини повітря донного вдування (20–35%) з бульбашками [5].

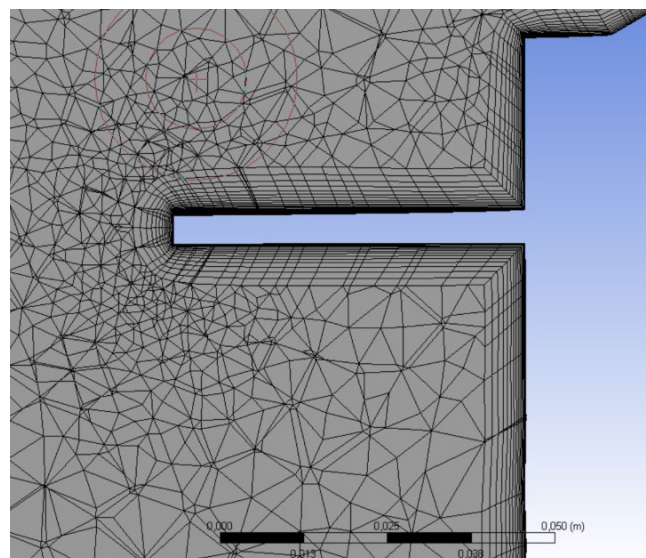


Рис. 3. Згущення сітки біля стінок камери

Табл. 1. Склад продуктів газифікації на виході з кип'ячого шару (масові частки)

CO ₂	CO	CH ₄	H ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂
0,1562	0,2011	0,0077	0,0118	0,0559	0,0271	0,5401

В результаті попереднього аналізу та тестування, виконаного в [6], було вибрано та застосовано наступний механізм хімічної кінетики спалювання:



Параметри Моделі Дисипації Вихорів для кожного рівняння наведено в таблиці 2.

Додатково використовувалися наступні параметри моделі: *Mixing rate limit* = 2500 1/c; *Chemical time*

Табл. 2. Параметри Моделі Дисипації Вихорів

Реакція	A_{EDC}	B_{EDC}
$2\text{CO} + \text{O}_2 = 2\text{CO}_2$	2	0,02
$2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$	4	0
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$	0,4	0,01

$scale = 5 \cdot 10^{-4}$ с. З цими параметрами результати моделювання добре узгоджуються з експериментом якісно та задовільно кількісно.

Результати розрахунків

Гідродинаміка потоку

На рис. 4 показані векторні діаграми абсолютної швидкості потоку для значень температури вторинного повітря 30°C та 300°C.

Підвищення температури вторинного повітря призводить до підвищення його тангенційної швидкості та відцентрових масових сил. Тому після виходу із діафрагми потік зі входною температурою вторинного повітря 300°C сильніше відкидається до стінок вторинної камери. Слід також відмітити, що у первинній камері спостерігається залучення продуктів газифікації у вихровий рух, тобто утворюється «наведений» центральний вихор. Цей вихор обертається по закону, близькому до закону твердотілого обертання. Це видно із рис. 5, на якому представлені радіальні профілі тангенційної швидкості потоку.

Центральна зона, яка відповідає закону $v/r = \text{const}$, одразу після вдування вторинного повітря займає приблизно три чверті діаметру, але по мірі просування вверх

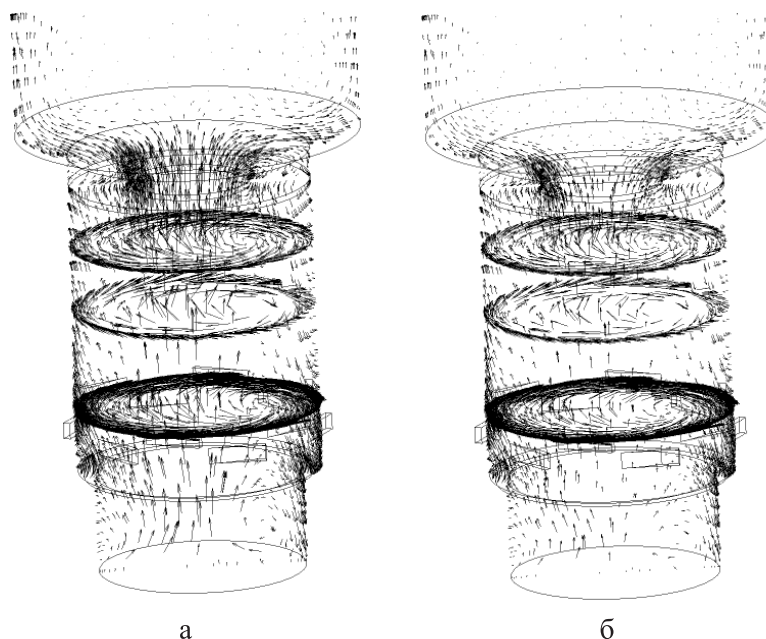


Рис. 4. Векторні діаграми абсолютної швидкості потоку.
а, б – температура вторинного повітря відповідно 30°C та 300°C

по потоку профіль трансформується, і «готується» до виходу через діафрагму.

Для якісного спалювання продуктів газифікації необхідно їх якісне перемішування зі вторинним повітрям. Як було відмічено вище, це перемішування суттєво інтенсифікується на границі двох вихрових потоків – пристінного (вторинне повітря) та централь-

ного (продукти газифікації). Причому цей процес підсилюється з підвищенням тангенційної швидкості вторинного повітря і, відповідно, відцентрових масових сил. На рис. 6 представлені радіальні профілі кінетичної енергії турбулентності.

Як видно із рисунка, варіанти з температурою вторинного повітря 30°C та 300°C суттєво відрізняються

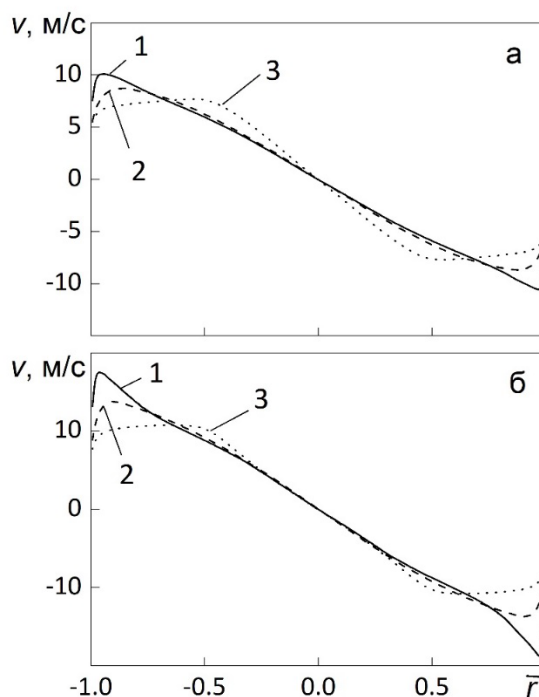


Рис. 5. Радіальний профіль тангенційної швидкості потоку у первинній камері після вдування вторинного повітря.

а, б – температура вторинного повітря відповідно 30°C та 300°C.

1, 2, 3 – координата «Z» відповідно 0,27 м, 0,33 м та 0,44 м (див. рис. 1)

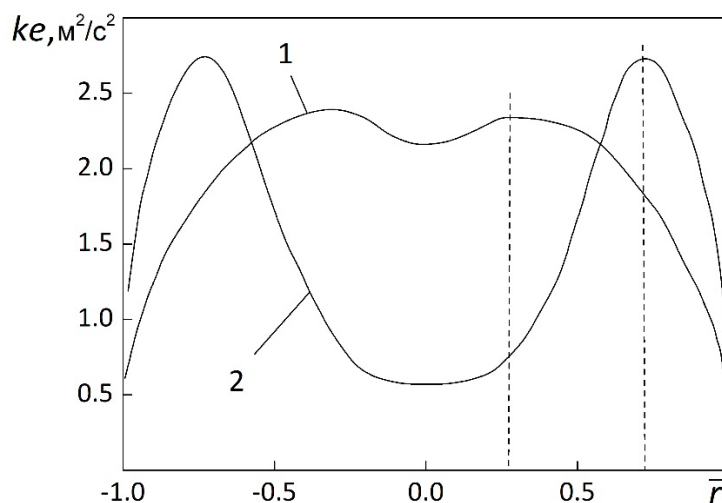


Рис. 6. Радіальний профіль кінетичної енергії турбулентності у вторинній камері згоряння після діафрагми ($Z = 0,51$ м, див. рис. 1): 1, 2 – температура вторинного повітря відповідно 30°C та 300°C

між собою. За рахунок більш інтенсивної дії відцентрових масових сил максимум кінетичної енергії турбулентності (пунктирні лінії на рис. 6) зміщується на периферію, зростає за абсолютним значенням, що призводить до більш ефективного перемішування центрального і периферійного потоків, і в результаті – до більш якісного горіння і менших викидів шкідливих речовин.

Температура потоку

На рис. 7 показано поле температур в топці для варіантів з температурою вторинного повітря 30°C та 300°C. Як видно із рисунка, при температурі вторинного повітря 300°C має місце утворення поблизу стінок вторинної камери зони підвищеної температури. Крім цього, в об'ємі камери температура потоку також є вищою, ніж для варіанту температури вторинного повітря 30°C. Також можна відмітити, що далекобійність струменя є дещо меншою для варіанту 300°C, що підвищує характерний термін перебування центрального ядра потоку в камері допалення. Тобто, підвищення температури вторинного повітря призводить до підвищення трьох необхідних складових якісного спалювання – температури, турбулентності та терміну перебування, які в літературі називаються умовами «три Т».

На виході із топки температура потоку слабо залежить від температури вторинного повітря, і складає величину 770°C. Це відбувається тому, що при підвищенні

температури на початковій ділянці вторинної камери збільшується тепловіддача в стінки, оскільки в розрахунку прийнято умову $T_w = \text{const} = 300^\circ\text{C}$

Екологічні характеристики топки

В результаті комп'ютерного моделювання були отримані поля концентрацій оксидів азоту та монооксиду вуглецю, а також їх інтегральні значення на виході із топки.

Підігрів вторинного повітря впливає на екологічні характеристики топки. В результаті підігріву зростає окружна швидкість вторинного повітря, що призводить до інтенсифікації перемішування і збільшення повноти згорання. На рис. 8 показана залежність концентрації оксиду вуглецю на виході із топки від температури вторинного повітря. Моделювання показало, що підігрів вторинного повітря з 30°C до 300°C знижує концентрацію оксиду вуглецю на виході з установки з 84 мг/м³ до 50 мг/м³, тобто більш, ніж у 1,5 рази. Слід відмітити, що розрахункові значення концентрації СО відповідають експериментальним значенням роботи [5], які знаходяться в інтервалі 50...150 мг/м³.

На відміну від монооксиду вуглецю, концентрація оксидів азоту практично не змінюється з підвищенням температури вторинного повітря, і складає величину 3,5 мг/м³.

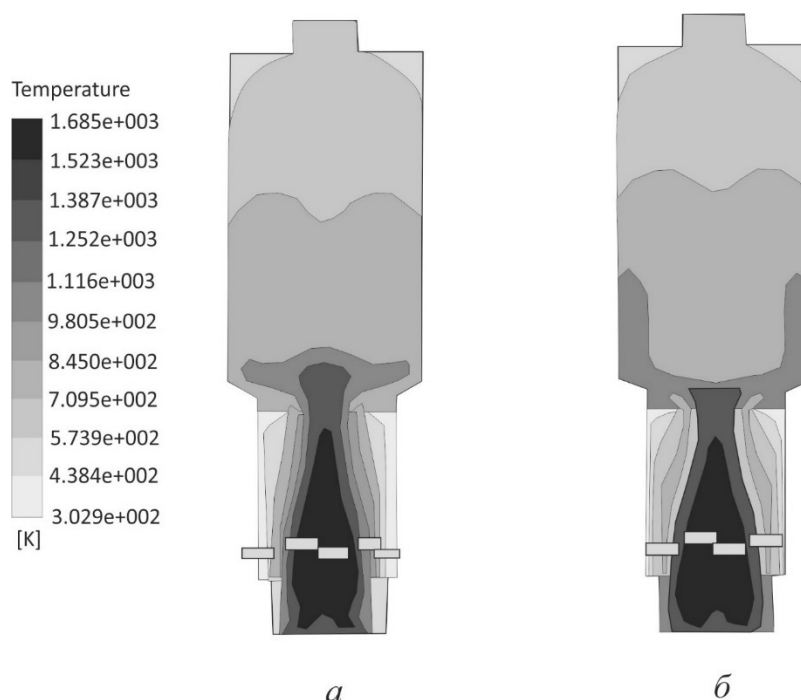


Рис. 7. Поле температур в об'ємі топки:

а, б – температура вторинного повітря відповідно 30°C та 300°C

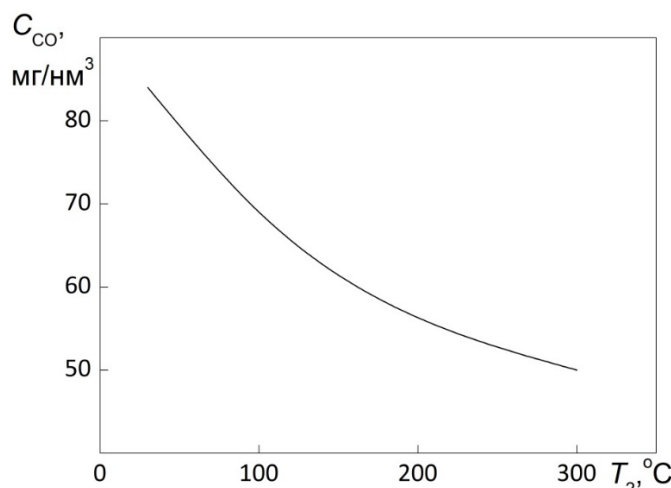


Рис. 8. Залежність концентрації оксиду вуглецю на виході із топки від температури вторинного повітря

Висновки

Проведено комп'ютерне моделювання допалювання продуктів газифікації біомаси у топці з киплячим шаром та вихровою подачею вторинного повітря, визначено вплив його підігріву на екологічні характеристики викидних газів.

Моделювання показало, що у первинній камері спостерігається залучення продуктів газифікації у вихровий рух, утворюється «наведений» центральний вихор, який обертається по закону, близькому до закону твердотілого обертання. Підвищення температури вторинного повітря призводить до збільшення його тангенційної швидкості, і, як наслідок, до збільшення відцентрових масових сил.

Зі збільшенням температури вторинного повітря за рахунок більш інтенсивної дії відцентрових масових сил максимум кінетичної енергії турбулентності зміщується на периферію, зростає за абсолютним значенням, що призводить до більш ефективного перемішування центрального і периферійного потоків, і в результаті – до більш якісного горіння.

При підвищенні температури вторинного повітря підвищується температура газу поблизу стінок вторинної камери і в об'ємі камери на початковій ділянці. На виході із топки температура потоку слабо залежить від температури вторинного повітря, оскільки при підвищенні температури на початковій ділянці вторинної камери збільшується тепловіддача в стінки.

Підігрів вторинного повітря впливає на екологічні характеристики топки. В результаті підігріву зростає окружна швидкість вторинного повітря, що призводить до інтенсифікації перемішування і збільшення повноти

згоряння. Моделювання показало, що підігрів вторинного повітря з 30°C до 300°C знижує концентрацію оксиду вуглецю на виході з установки більш, ніж у 1,5 рази. Концентрація оксидів азоту практично не змінюється з підвищенням температури вторинного повітря, і складає величину 3,5 мг/м³.

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

ЛІТЕРАТУРА:

1. Zuberbuhler U., Baumbach G. Low NOX furnace engineering for residual and used wood combustion for the improvement of particle burn-out and efficiency in industrial // Biomass for energy and industry. Proc. Of the 10th European Conf. C.A.R.M.E.N. Publisher, 1998, pp.1389-1392.
2. Tejerot I., Trujillot A., Leon E.H. An efficient technology for the combustion of biomass // Proc. Of 1st World Conference on biomass for energy and industry, June 2000, Sevilla, Spain, Vol. II, James&James Ltd. (ed), London, UK, pp. 886-889.
3. Gaegauf C.K., Wieser U. Biomass burner with low emission of particulates // Biomass for energy and industry. Proc. Of the 10th European Conf. C.A.R.M.E.N. Publisher, 1998, pp.1509-1512.
4. Khalatov A, Borisov I, Kobzar S, Kovalenko G, Khlebnikov O (2007) Investigations of Institute for Engineering Thermophysics (Thermogasdynamics Depart-

ment) in the area of combustion and gasification of alternative fuels, In: Syred N., Khalatov A. (eds) *Advanced Combustion and Aerothermal Technologies*. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security (2007) 231-245. Springer, Dordrecht. ISBN 978-1-4020-6513-2. doi.org/10.1007/978-1-4020-6513-2_18.

5. *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.

6. *Кобзар С.Г., Коваленко Г.В., Халатов А.А.* Моделювання горіння продуктів газифікації твердого палива в киплячому шарі в надшаровому просторі з вихровим допалюванням // *Теплофізика та теплоенергетика*. 2021, т.43, №2 С.77–83.

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

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

CFD MODELING OF VORTEX AFTERBURNING OF BIOMASS GASIFICATION PRODUCTS IN A FLUIDIZED BED FURNACE

Kobzar S¹, Borisov I¹, Khalatov A.¹, Teplitski, A.², Pitsukha Y.²

¹*Institute of Engineering Thermophysics, NAS of Ukraine, ul. Marii Kapnist, 2a, Kiev, 03057, Ukraine*

²*A.V.Luikov Heat and Mass Transfer Institute, Brovki str.,15, 220072, s, Minsk, Belarus*

<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2021.10>

CFD modeling of the afterburning of biomass gasification products in a fluidized bed furnace with a vortex supply of secondary air has been carried out. The effect of secondary air heating on the ecological characteristics of flue gases has been determined. Modeling has shown that gasification products swirl in the primary chamber with the formation of a central vortex, which obeys the law of solid-body rotation. An increase in the temperature of the secondary air leads to an increase in its tangential velocity and, as a consequence, to an increase in centrifugal mass forces. Calculations have shown that with an increase in the secondary air temperature, the maximum of the kinetic energy of turbulence shifts to the periphery and increases in absolute value. This results in more efficient mixing of the central (producer gas) and peripheral (secondary air) streams. As a result, this leads to a more complete combustion. The influence of secondary air heating on the ecological characteristics of the furnace has been determined. As a result of air heating from 30° C to 300° C, the concentration of carbon monoxide decreases by more than 1.5 times. The concentration of nitrogen oxides practically does not change and amounts to 3.5 mg /nm³.

References 7, fig. 8, tables. 2.

Key words: fluidized bed furnace, biomass; vortex afterburning, turbulent mixing, ecological characteristics.

1. Zuberbuhler U., Baumbach G. Low NOX furnace engineering for residual and used wood combustion for the improvement of particle burn-out and efficiency in industrial // Biomass for energy and industry. Proc. Of the 10th European Conf. C.A.R.M.E.N. Publisher, 1998, pp.1389-1392.

2. Tejerot I., Trujillot A., Leon E.H. An efficient technology for the combustion of biomass // Proc. Of 1st World Conference on biomass for energy and industry, June 2000, Sevilla, Spain, Vol. II, James&James Ltd. (ed), London, UK, pp. 886-889.

3. Gaegauf C.K., Wieser U. Biomass burner with low emission of particulates // Biomass for energy and industry. Proc. Of the 10th European Conf. C.A.R.M.E.N. Publisher, 1998, pp.1509-1512.

4. Khalatov A, Borisov I, Kobzar S, Kovalenko G, Khlebnikov O (2007) Investigations of Institute for Engineering Thermophysics (Thermogasdynamics Department) in the area of combustion and gasification of alternative fuels, In: Syred N., Khalatov A. (eds) Advanced Combustion and Aerothermal Technologies. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security (2007) 231-245. Springer, Dordrecht. ISBN 978-1-4020-6513-2. doi.org/10.1007/978-1-4020-6515-6_18.

5. Pitsukha Ya.A. Scientific basis for creation highly-efficient cyclone-bed furnaces for boilers using solid biofuel: Doctor of tech. Sci. Thesis: 05.14.04, The A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute, Minsk, 2019, 46 pc.

6. Кобзар С.Г., Коваленко Г.В., Халатов А.А. The computer simulation of the combustion of the gasification products in fluidized bed of solid fuel in upper bed layer wit vortex burning // Thermophysics and Thermal Power Engineering. 2021, V..43, No 2 P.77–83.

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

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

Отримано 07.09.2021

Received 07.09.2021