

УДК 62-664.2

Аеродинамічні характеристики процесу спалювання тирси в вихровій топці

Р. Л. Джиоев¹, І. О. Редько², А. О. Редько³, Ю. О. Півненко⁴, Ю. О. Бурда⁵, С. О. Алфьоров⁶, О. В. Приймак⁷

¹ асп. Харківський національний університет будівництва та архітектури, м. Харків, Україна, office@khgorgas.com.ua, ORCID 0000-0003-4046-7038

² д.т.н., проф. Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна, germes_s2006@ukr.net, ORCID:0000-0002-9863-4487

³ д.т.н., проф. Харківський національний університет будівництва та архітектури, м. Харків, Україна, andrey.ua-mail@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2331-7273

⁴ к.т.н., асист. Харківський національний університет будівництва та архітектури, м. Харків, Україна, pivnenko.yura@gmail.com, ORCID 0000-0002-6675-2649

⁵ к.т.н., асист. Харківський національний університет будівництва та архітектури, м. Харків, Україна, burda.yurii@gmail.com, ORCID 0000-0003-3470-1334

⁶ асп. Харківський національний університет будівництва та архітектури, м. Харків, Україна, sergey.alf312@gmail.com, ORCID 0000-0003-3451-1004

⁷ д.т.н., проф. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, 02opriymak@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9515-9879

Анотація. У даний час одним із основних напрямків стратегічного розвитку України є досягнення енергетичної незалежності. Для реалізації цього необхідно впроваджувати системи використання наявних у нашій державі енергетичних ресурсів. Оскільки значну частину економічної діяльності країни займає сільськогосподарська діяльність, застосування низькосортних видів палив, більшість з яких є відходами саме даної сфери, є актуальним і вигідним з економічних та екологічних міркувань. При цьому реконструкція котлів, удосконалення методів і способів спалювання в вихрових топках низькосортних видів палива дозволить суттєво скоротити споживання імпортованого природного газу і наблизити країну до статусу енергетично незалежної держави. При цьому на виході з топки забезпечується висока ефективність сепарації частинок, у яких ступінь вигорання коксу становить 100%. Значення об'ємної концентрації частинок $\beta < 3 \cdot 10^{-2}$ характеризує аеродинамічний режим руху частинок у топці, як режим газової суспензії. У статті наведено результати чисельного дослідження поведінкових характеристик процесу спалювання деревної тирси діаметром від 25 мкм до 750 мкм у вихровій топці з зустрічними закрученими потоками повітря. Наведено поля статичного тиску та абсолютної швидкості в топковому об'ємі. Показано зміну густини потоку, об'ємної концентрації частинок за висотою топки. Витратна концентрація частинок становить 0,094 кг/кг повітря. У ході виконання досліджень визначено основні характеристики процесу спалювання деревної тирси у вихровій топці з зустрічними закрученими потоками повітря, а саме: більш висока швидкість газів спостерігається в пристіновій області в нижній частині топки; при збільшенні діаметрів частинок палива зона із максимальним вмістом коксу в них переміщується із нижньої зони топки до верхньої; тиск газів змінюється незначно як по висоті, так і по перетину топки.

Ключові слова: спалювання палива, вихрові топки, сепарація частинок, швидкість паливно-повітряної суміші.

Вступ. Для підвищення рівня енергетичної незалежності України, а саме зменшення споживання природного газу, використовують різні місцеві палива та відходи (деревні відходи, газоподібні, низькосортні палива та ін.). Для спалювання низькосортних палив реконструюються топки котлів. На даний час ще недостатньо вивченим є енергоефективність процесів спалювання низькосортних видів палива в топках.

Актуальність дослідження. У даний час одним із основних напрямків стратегічного розвитку України є досягнення енергетичної незалежності. Для реалізації цього необхідно впроваджувати системи використання наявних у нашій державі енергетичних ресурсів. Оскільки значну частину економічної діяльності країни займає сільськогосподарська діяльність, застосува-

ння низькосортних видів палив, більшість з яких є відходами саме даної сфери, є актуальним і вигідним з економічних та екологічних міркувань. При цьому реконструкція котлів, удосконалення методів і способів спалювання в вихрових топках низькосортних видів палива дозволить суттєво скоротити споживання імпортованого природного газу і наблизити країну до статусу енергетично незалежної держави.

Останні дослідження та публікації. У 2020 році в Німеччині на деревній біомасі – тирсі та пеллетах, – працює понад 550 газогенераторних електростанцій. За їхньою кількістю країна знаходиться на першому місці у світі. Сьогодні Німеччина є основним виробником обладнання для газифікації біомаси в Європі. Однак, висока вартість обладнання (близько 5-6 тисяч євро за

1 кВт електроенергії) обмежує його широке застосування [1]. При цьому продовжують розвиватися технології спалювання біопалив.

У наш час для спалювання біомаси і різних паливних відходів широко застосовуються топки, обладнані решітками для спалювання біомаси високої вологості, різного фракційного складу і високої зольності.

Для спалювання відходів сільського господарства застосовуються топки з вібраційною чи обертовою решіткою [2-5].

Спалювання твердих палив і топкових відходів у топках з киплячим шаром здійснюється в комерційних котлах різної потужності з великим топковим об'ємом. Застосовуються наявні котли після їхньої модернізації та котли нових конструкцій [2-6].

Шахтні топки з нерухомою похилою решіткою застосовуються для спалювання вологих деревних відходів. Однак, вони характеризуються низькою ефективністю спалювання палива. При цьому через значний об'єм вологого палива регулювання процесу горіння ускладнене.

Топки з зануреними поверхнями нагріву застосовувались у котлах вугільних шахт в Україні [7, 8]. Топки з поворотними поверхнями забезпечують регулювання теплової потужності котла і підтримують температуру киплячого шару.

Технологічні обмеження спалювання твердого палива в киплячому шарі – висота шару повинна становити понад 350 мм при теплонарузі активної площі решітки понад 10 МВт/м². При цьому малі габарити топкового об'єму ускладнюють роботу систем подачі вторинного повітря повернення виносу, регулювання процесу горіння. Рекомендована теплова потужність котлів становить понад 6 МВт.

Останнім часом з'явилися топки, у яких поєднується процес спалювання палива в киплячому шарі з вихровим спалюванням у надшаровому просторі. У [10] наведена теплова схема циклонно-шарової топки, у якій первинне повітря подається під шар, створюючи закручений газований потік.

Сучасна промисловість випускає комерційні котли з киплячим шаром (фірма Kawasaki): котли з бульбашковим киплячим шаром; котли із зовнішньою та внутрішньою циркуляцією киплячого шару. У роботах [11-13] показана ефективність застосування технології киплячого шару при спалюванні деревних відходів різного фракційного складу. Однак, для досягнення сталого гідравлічного режиму псевдозрідження дрібнофракційного деревного палива з'являється необхідність застосування шароутворювального інертного матеріалу через велику парусність деревного палива.

Більш ефективними для спалювання дрібного палива є топки швидкісного горіння – циклонні та вихрові топки, що характеризуються низькою металоємністю, малими габаритами та простою конструкцією [17, 18]. При цьому спалювання біомаси характеризується пошаровою подачею повітря і палива в топку чи камеру згорання, а також вигоранням частинок палива при великій швидкості й обмеженому об'ємі топки [16].

У [15, 16] наведено конструкцію камери згорання газотурбінного двигуна для спалювання деревного пилу. Наведено результати моделювання процесів спалювання пилу з концентрацією 74,8 мг/м³. Вказано, що спостерігається нерівномірність температурного поля на виході з камери згорання, що становить 23 % за середньої температури газів на виході 1147 °С. У [18] наведено опис теплової схеми вихрової топки з убудованими закрученими лопатками та параметри роботи процесів при спалюванні торфу.

Перспективним напрямком спалювання паливних відходів є створення інтенсивних процесів у вихрових топках. Вихрові технології все більш широко використовуються при організації горіння рідких, твердих і газоподібних палив [22, 23]. Їх широко застосовують в енергетиці з 1970 року [24-34] та аспіраційних системах [35].

Основні переваги вихрової технології спалювання полягають у поліпшенні екологічних показників, стійкості спалахування та горіння твердого палива. Вихрова технологія забезпечує спалювання твердих палив, таких як кам'яне й буре вугілля, горючі сланці, торф, відходи оброблення деревини та інші види біопалива. Вона може бути реалізована в традиційних камерних топках за рахунок їхньої модернізації. Вихрові технології використовують принцип спалювання твердого палива в умовах багаторазової циркуляції частинок у камерній топці.

У камерній топці великі завихрення не забезпечують цілісність потоку. Циклоно-вихрова технологія спалювання твердого палива дозволяє зменшити топковий об'єм котельного агрегату, його габарити й масу. Інтенсивне перемішування частинок палива та повітря в закрученому потоці забезпечує інтенсивний тепломасообмін і спалювання палива.

Формулювання цілей статті. Метою даної роботи є чисельне дослідження характеристик процесу спалювання деревної тирси у вихровій топці з зустрічними закрученими потоками повітря.

Метод дослідження. Методика досліджень базується на фізико-математичних методах теоретичних досліджень процесів спалювання низькосортних газоподібних та твердих палив на

основі законів і рівнянь фізико-хімічної кінетики, аеродинаміки та тепломасообміну, і зокрема, фізико-математичного моделювання взаємодії струмин. Застосовано методи експериментальних лабораторних і натурних досліджень на основі сучасних теорій постановки, виконання, математичної обробки й отримання достовірних даних результатів теплофізичного експерименту [19,20].

Чисельні дослідження проводилися за допомогою системи диференціальних рівнянь у частинних похідних (ДРЧП), яку складено з осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса, двох рівнянь диференційної k - ε моделі турбулентності, рівнянь збереження для безрозмірних функцій Шваба-Зельдовича і для пульсацій цих функцій, а також інтегро-диференціального рівняння переносу випромінювання.

$$\rho \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = S_n, \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с});$$

$$\rho \frac{\partial u_j u_j}{\partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} = S_{fi}, \text{ Па}/\text{м},$$

$$\rho \frac{\partial u_j h}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_m}{Pr_m} \right) \frac{\partial h}{\partial x_j} = S_Q, \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{с}),$$

$$\rho \frac{\partial u_j k}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_m}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} - \rho(G - \varepsilon) = 0, \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с}^3),$$

$$\rho \frac{\partial u_j \varepsilon}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_m}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} -$$

$$- \rho(C_{\varepsilon 1} G - C_{\varepsilon 2} \varepsilon) \frac{\varepsilon}{k} = 0, \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с}^4),$$

$$j=1, 2, 3,$$

$$\rho \frac{\partial (\vec{u} f_n)}{\partial x_q} = \frac{\partial}{\partial x_q} \left(\frac{\mu_m}{\sigma_m} \frac{\partial f_n}{\partial x_q} \right) + S_n,$$

$$\rho \frac{\partial (\vec{u} g_n)}{\partial x_q} = \frac{\partial}{\partial x_q} \left(\frac{\mu_m}{\sigma_m} \frac{\partial g_n}{\partial x_q} \right) + C_g \mu_m \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_q} \right)^2 - C_d \rho \frac{\varepsilon}{k} g_n,$$

$$q = 1, 2, n = 1, 2, 3,$$

$$\frac{1}{\beta_0} \frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + I(\vec{r}, \vec{s}) =$$

$$= (1 - \omega_0) I_b(\vec{r}) + \frac{\omega_0}{4\pi} \int_{\Omega=4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}) d\Omega', \text{ Вт}/\text{м}^2,$$

де u_j – декартові компоненти вектора усередненої швидкості газу, м/с; x_j – декартові координати, м; S_n – джерело маси, відповідне переносу маси в газову фазу від частинок, що реагують, кг/(м³ с); ρ – густина газу, кг/м³; p – тиск газу, Па; τ_{ij} – компоненти тензора напружень

$$\tau_{ij} = (\mu + \mu_m) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \text{ Па};$$

μ – динамічна в'язкість, Па·с; μ_m – турбулентна в'язкість, що визначається за формулою Колмогорова-Прандтля;

$$\mu_m = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \text{ Па} \cdot \text{с};$$

C_μ – емпіричний коефіцієнт; k – кінетична енергія турбулентності

$$k = \frac{1}{2} u'_i u'_i, \text{ м}^2/\text{с}^2;$$

u'_i – збурення швидкості газу відносно усередненого значення, м/с; ε – питома швидкість дисипації кінетичної енергії турбулентності

$$\varepsilon = \frac{1}{2} v \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \right)^2, \text{ м}^2/\text{с}^3;$$

v – коефіцієнт кінематичної в'язкості, м²/с; S_{fi} – джерело кількості руху, обумовлене міжфазною взаємодією, Па/м; h – питома ентальпія;

$$h = \sum_i Y_i \left(\Delta h_{fi}^0 + \int_{T^0}^T c_{pi}(T) dT \right), \text{ Дж}/\text{кг};$$

Y_i – масова частка хімічного компонента i ; Δh_{fi}^0 – питома ентальпія освіти хімічного компонента i , Дж/кг; T – температура газу, К; T^0 – стандартна температура, К; c_{pi} – питома теплоємність хімічного компонента i при постійному тиску, Дж/(кг·К); Pr – число Прандтля; Pr_m – турбулентне число Прандтля; S_Q – джерело теплоти, Дж/(м³·с), обумовлене міжфазною взаємодією з частинками; σ_k , σ_ε , $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, C_g , C_d , σ_T , – емпіричні коефіцієнти; G – член, що характеризує генерацію кінетичної енергії турбулентності за рахунок зсувних напружень

$$G = \mu_T \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \text{ м}^2/\text{с}^3;$$

$\beta_0 = k_a + \sigma_s$ – об'ємний коефіцієнт загасання, м⁻¹;

k_a – об’ємний коефіцієнт поглинання, m^{-1} ;
 σ_s – об’ємний коефіцієнт розсіювання, m^{-1} ;
 I – інтенсивність випромінювання, $Вт/м^2$; \vec{r} –
 радіус-вектор довільного променя в кутовому
 напрямку поширення випромінювання \vec{s} ;
 $\omega_0 = \sigma_s / \beta_0$ – альbedo розсіювання; $I_b = \sigma T^4 / \pi$ –
 інтенсивність випромінювання абсолютно
 чорного тіла, $Вт/м^2$; σ – стала Стефана-Больц-
 мана, $Вт/(м^2 \cdot K^4)$; Ω – одиничний вектор тілесного
 кута, що характеризує напрям поширення тепло-
 вого випромінювання внаслідок розсіювання фо-
 тонів \vec{s} ;

Безрозмірна функція Шваба-Зельдовича ви-
 значається виразом

$$f_n = \frac{Z_q - Z_{q,O}}{Z_{q,F_1} - Z_{q,O}},$$

$$f_1 + f_2 + f_0 = 1,$$

де Z_q – масова частка елемента q ; індекси « F_1 » і
 « O » відносяться до первинного палива й оки-
 слювача відповідно.

Всі термохімічні скаляри ϕ_i (масові частки
 хімічних компонентів, щільність і температура)
 залежать винятково від f_n , а саме

$$\phi_i = \int_0^1 \int_0^1 \phi_i(f_1, f_2, h) P_1(f_1) P_2(f_2) d f_1 d f_2,$$

де h – миттєва ентальпія; $P_n(f_n)$ – функція ПРВ,
 що описує ймовірність того, що значення змінної
 ϕ_i знаходиться між ϕ і $\phi + \Delta\phi$ і апроксимується
 β -функцією.

Рівняння стану суміші ідеальних газів

$$p = R \rho T \sum_i \frac{Y_i}{M_i}, \text{ Па,}$$

де R – універсальна газова постійна,
 Дж/(моль·К); M_i – молекулярна маса хімічного
 компонента i .

Весь діапазон початкових розмірів частинок
 торфу ділився на скінченне число дискретних
 інтервалів. Кожен з них замінюється середнім
 діаметром, для якого виконувався розрахунок
 траєкторії і тепломасообміну. При цьому кожна
 моделювальна частинка є «пакетом» частинок з
 однаковими траєкторіями. Розподіл частинок за
 розмірами описувався формулою
 Розіна-Рамплера

$$Y_d = e^{-(d/\bar{d})^n},$$

де Y_d – масова частка частинок з діаметром d , м;
 \bar{d} – медіанний діаметр частинок, м; n – параметр

розподілу.

Траєкторії часток моделювалися шляхом інте-
 грування рівняння балансу сил, що діють на ча-
 стку, яка вирівнює інерцію частки та силу
 аеродинамічного опору

$$\frac{d u_{pj}}{dt} = \frac{-3 \rho C_R}{4 \rho_p d_p} (u_{pj} - u_j) \sqrt{\sum_j (u_{pj} - u_j)^2}, \text{ м/с}^2,$$

$$j = 1, 2, 3,$$

де u_{pj} – декартові компоненти вектора швидкості
 частинки, м/с; t – час, с; ρ – густина газу, $кг/м^3$;
 C_R – коефіцієнт аеродинамічного опору части-
 нки; Re_p – відносне число Рейнольдса частки;
 ρ_p – густина частинки; d_p – діаметр частинки, м;
 u_j – декартові компоненти вектора швидкості га-
 зу, м/с [20].

Чисельно досліджувалися процеси спалюван-
 ня деревної тирси діаметром від $d_{min} = 25$ мкм до
 $d_{max} = 750$ мкм у вихровій топці теплопродукти-
 вністю 2,6 МВт. Побудовано розрахункову сітку
 (рис. 1).

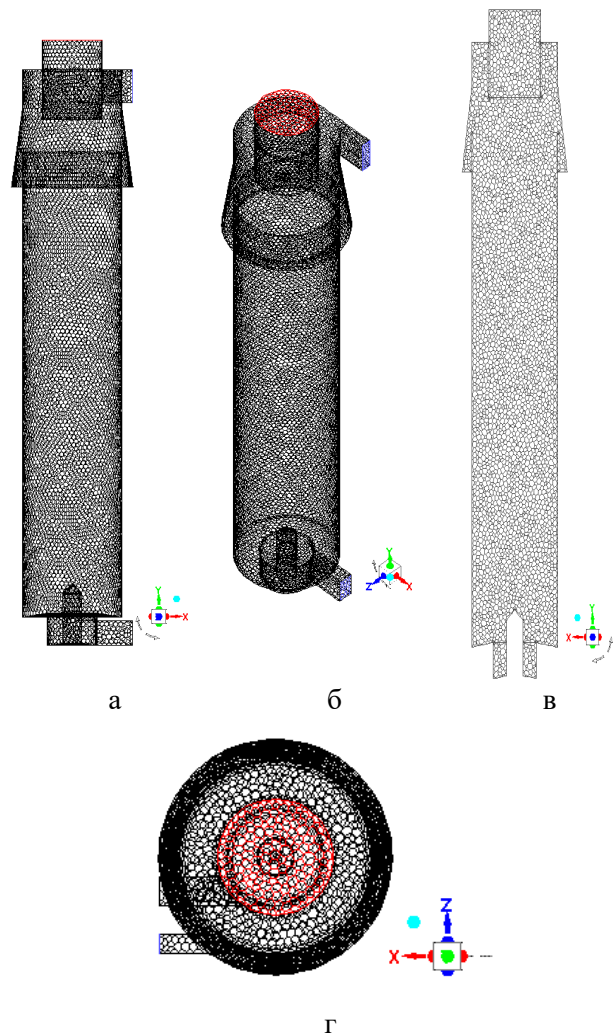


Рис. 1 Розрахункова сітка:
 а – вид збоку; б – ізометрія;
 в – повздовжній переріз топки $z=0$; г – вид зверху

Моделювання виконано для палива з елементарним складом: С – 50 %; Н – 6 %; О – 43,5%; N – 0,5%. Технічний склад: вологість 10 %; зольність на суху масу $A_c = 0,6\%$, на робочу $A_p = 0,54\%$; вихід летючих на горючу масу 85 %, на робочу $V_p = 76,041\%$.

Характеристики палива такі: вища теплота згоряння (на робочу масу) 17,676 МДж/кг; теплоємність 1,70 кДж/кг; густина 500 кг/м³; температура виходу летючих 200 °С. Витрата тирси становила 0,145 кг/с, витрата первинного повітря, що подається знизу топки становила 1,285 кг/с, витрата вторинного повітря 0,255 кг/с.

Результати та їхнє обговорення. Результати розрахунку вказують, що ступінь вигорання легкої тирси становить 100 %. Ступінь вигорання коксу з частинок, що виносяться, також становить 100%. При цьому винос частинок становить 56 %, уловлювання частинок – 31 %. Біля 13 % частинок накопичується у топковому об'ємі довгий час до повного вигорання. Вихід кисню становить 9,5 %, температура вихідних газів 1473 °С.

Розглянемо розподіл абсолютної швидкості газу, м/с, у повздовжньому перерізі топки (рис. 2) та траєкторії руху частинок (рис. 3). Більш висока швидкість газів, близько 30...40 м/с, спостерігається в пристіновій області в нижній частині топки. Розрахункова швидкість повітря на вході в топку становить 5-8 м/с. На осі топки у всій її висоті швидкість газів низька і становить менше 10 м/с.

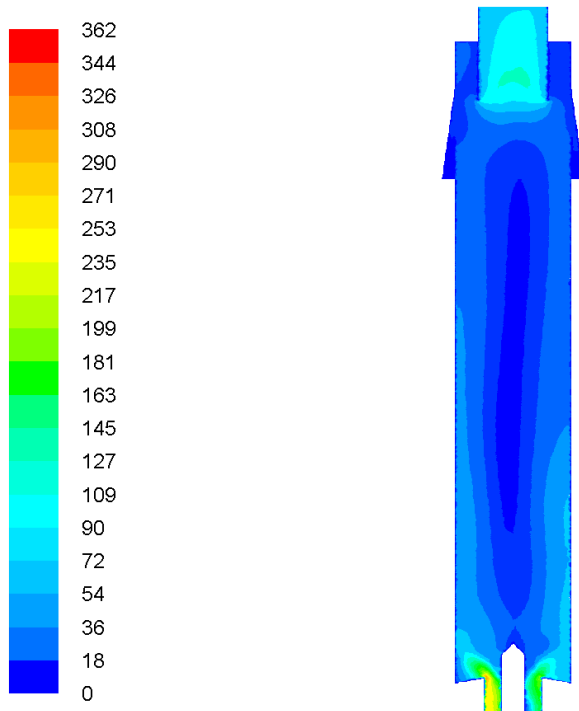


Рис. 2 Розподіл абсолютної швидкості газу, м/с, у повздовжньому перерізі топки

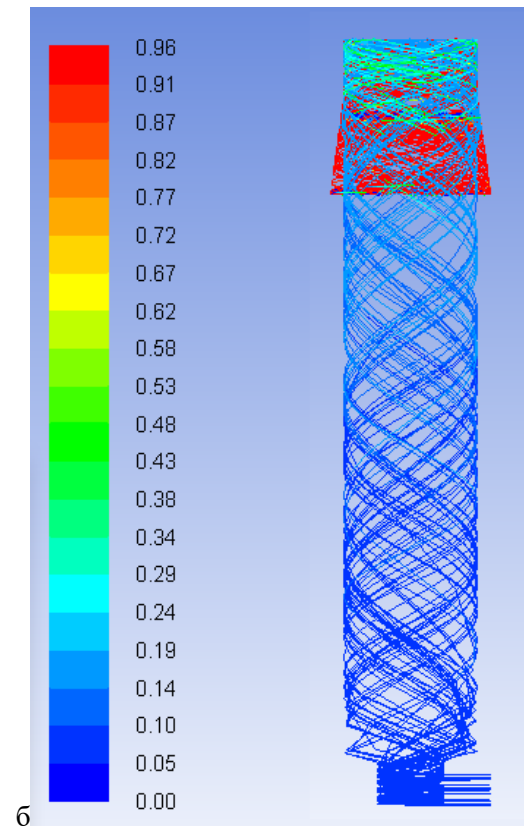
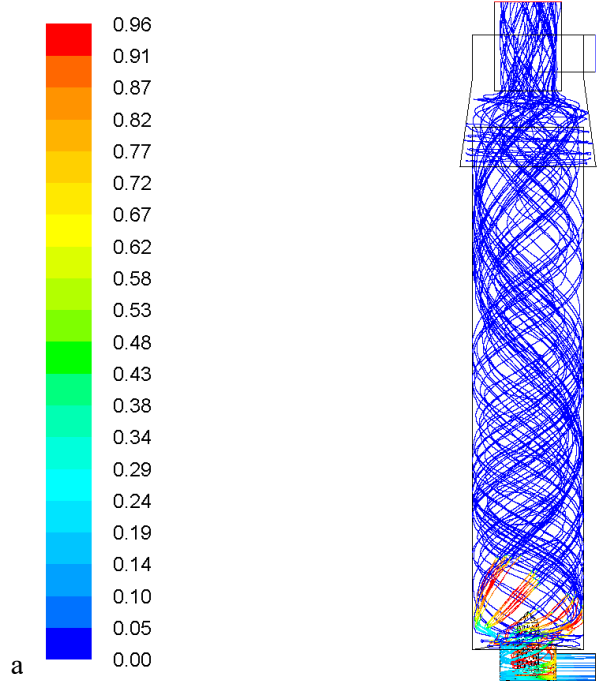


Рис. 3 Траєкторії частинок пофарбовані згідно масової долі коксу в їхньому складі з початковим діаметром: а – 25 мкм, б – 750 мкм,

Висновки. Виявлено особливості процесу спалювання деревної тирси у вихровій топці з зустрічними закрученими потоками повітря: більш висока швидкість газів спостерігається в пристіновій області у нижній частині топки; при збільшенні діаметрів частинок палива зона із максимальним вмістом коксу в них переміщує-

ться із нижньої зони топки до верхньої; тиск газів змінюється незначно як за висотою, так і за періодом топки.

Перспективи подальших досліджень. В подальшому планується розглянути основні ха-

рактеристики процесу спалювання твердого палива у вихрових топках із застосуванням спеціальних напрямних пластин для паливно-повітряної суміші.

Література

1. Передерий С. Газогенераторные электростанции мировой трэнд? / С. Передерий // ЛесПромИнформ. – 2021. – №1(155). URL: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=5890>
2. Карапетов А. Слоевое сжигание биотоплива. Обзор технологий / А. Карапетов // ЛесПромИнформ. – 2016. – №1(115). URL: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=4301>
3. Баскаков А.П. Котлы и топки с кипящим слоем / А.П. Баскаков, В.В. Мацнев, И.В. Распопов. – Москва: Энергоатомиздат, 1996.
4. Махорин К.Е. Сжигание топлива в псевдооживленном слое / К. Е. Махорин, П. А. Химкис. – Киев. Наукова думка, 1989.
5. Кучин Г.П. Сжигание низкосортных топлив в псевдооживленном слое / Г.П. Кучин, В.Л. Скрипко. – Киев: Техника, 1987.
6. Пузырев Е. М. Исследование топочных процессов и разработка котлов для низкотемпературного сжигания горючих отходов и местных топлив; дис. ... докт. техн. наук.: 01.04.14: захищ. 28.11.2003 / Пузырев Евгений Михайлович; Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова. – Барнаул, 2003. – 322 с.
7. Редько А.Ф. Теплообмен в топках с кипящим слоем: Учебное пособие / А.Ф. Редько. – Киев: УМК ВО, 1990, – 72с.
8. Бочаров А.А. Проблемы тепло- и массообмена в современной технологии сжигания и газификации твердого топлива / А.А. Бочаров, Ж.В. Вискин. – Минск, 1988.
9. Рябов Г.А. Особенности процессов сжигания биотоплива в котлах с кипящим слоем / Г.А. Рябов, Э.П. Дик, А.Н. Соболева, Т.Е. Соловьева // Теплоэнергетика. – 2005. – №9. – С. 54-60.
10. Пицуха Е.А. Научные основы создания высокоэффективных циклонно-слоевых топочных устройств для котлов, работающих на твердом биотопливе; дис. ... докт. техн. наук.: 05.14.04: захищ. 23.04.2019 / Пицуха Евгений Александрович; Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси. – Минск, 2019. – 337 с.
11. Пивненко Ю. А. Исследование процесса сжигания древесных отходов в топках с кипящим слоем / Ю. А. Пивненко // Экология и промышленность. – 2016. – №2. – С. 73-76.
12. Редько О. Ф. Дослідження псевдозрідження полідисперсних бінарних систем у топках киплячого шару / О. Ф. Редько, Ю. О. Пивненко // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання : наук.-техн. зб. – 2017. – Вип. 22 – С. 43-48.
13. Редько А. Ф. Экспериментальные исследования сжигания биотоплива в кипящем слое / А. Ф. Редько, И. А. Редько, Ю. А. Пивненко // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання : наук.-техн. зб. – 2017. – Вип. 23. – С. 52-60..
14. Рябов Г. А. Опыт сжигания различных видов биомассы в России и Белоруссии / Г. А. Рябов, Д. С. Литун, Е. А. Пицуха, Ю. С. Теплицкий, В. А. Бородуля // Электрические станции. – 2015. – №9(1010). – С. 9-17
15. Пчелкин Ю.М. Камеры сгорания газотурбинных двигателей / Ю.М. Пчелкин. – Москва: Машиностроение. 1984. – 280 с.
16. Сорунзан А. Исследование процессов сжигания пылевидного биотоплива в стесненных условиях камер сгорания / А. Сорунзан, Д.А. Хохлов, К.А. Плешанов // Энергетика. Технологии будущего: III Науч.-техн. конф. студентов (20 – 22 мая 2020 г., Москва): Сб. тр. конф. – Москва: Издательство МЭИ, 2020. – С. 187-192..
17. Сидельковский Л. Н. Парогенераторы промышленных предприятий / Л. Н. Сидельковский., В. Н. Юренев. – Москва: Энергия, 1978. – 336 с..
18. Шукин В.К. Теплообмен, массообмен и гидродинамика закрученных потоков в ассиметричных каналах / В.К. Шукин, А.А. Халатов.. – Москва: Машиностроение, 1982 – 200 с.
19. Redko A. Numerical modeling of peat burning processes in a vortex furnace with countercurrent swirl flows / A. Redko, Y. Burda, R. Dzhyoiev, I. Redko, V. Norchak, S. Pavlovskiiy, O. Redko // Thermal Science. – 2021. – Vol. 25. – Iss. 3. – Part A. – pp. 1905-1919. <https://doi.org/10.2298/TSCI190305158R>
20. Редько І.О. Централізовані системи теплопостачання на основі удосконалених технологічних методів і способів спалювання альтернативних палив: автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.03 / Редько Ігор Олександрович ; Київ. нац. ун-т буд-ва і архітектури. – Київ, 2020. – 41 с.

21. Горбис З.Р. Теплообмен и гидродинамика дисперсных сквозных потоков / З.Р. Горбис. – Москва: Энергия 1970. – 424 с.
22. . Халатов А. А. Компьютерные технологии в модернизации котлов и камер сгорания / А. А. Халатов, С. Г. Кобзарь // Аква-терм, 2007. – №1. – С.12-15.
23. Алексеев С. В. Чисельне та експериментальне моделювання турбулентних течій в топкових камерах / С. В. Алексеев, І. Н. Гусев, В. М. Єрошенка, В. Б. Рабовський // Інженерно-фізичний журнал. – 1990. – Т. 5. – №6. – С. 948-955.
24. Устименко Б. П. Чисельне моделювання аеродинаміки і горіння в топкових технологічних пристроях / Б. П. Устименко, К. Б. Джакубов, В. О. Кроль. – Алма-Ата: Наука, 1986.
25. Askarova A.S. Optimization of the combustion of power-station technologies / A.S. Askarova, E.I. Karpenko, I.V. Loktionova, V.E. Messerle, A.V. Ustimenko // Thermal Engineering. – 2004. Vol.51.– №6. – P. 488–493.
26. Щелоков В. И. Модернизация водогрейных водотрубных котлов типа ПТВМ и КВГМ / В. И. Щелоков, В.В. Ладнычев, И.Д. Лисейкин, А. В. Тодорович // Новости теплоснабжения. – 2004.. – №5 (45). URL: https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=1922
27. Устименко Б. П. Вогняне моделювання пиловугільних топков / Б. П.Устименко, Б. К. Аліяров, Е. К. Абубакиров.. – Алма-Ата: Наука, 1982.
28. Аскаророва А.С. Исследование образования вредных веществ в камере сгорания БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ / А.С. Аскаророва, С.А. Болегенова, С.А. Максимов, А. Бекмухамет, Ш.С. Оспанова // Материалы VIII Всероссийской конференции с международным участием «Горение твердого топлива» Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 13–16 ноября 2012 г. Новосибирск. – 2012. – С. 9.1-9.4.
29. Ахмедов Р. Б. Дуттеві газопальникові пристрої / Р. Б. Ахмедов. - Москва: Недра. 1970.
30. Серант Ф. А. Разработка и исследование кольцевой топки, ее промышленное внедрение и испытания на котле паропроизводительностью 820 т / ч : дис. докт. техн. наук 05.14.14 в форме науч. докл.: защищено. 19.11.1999 / Серант Феликс Анатольевич. ОАО "Сибтехэнерго", ЗАО "СибКС»ЮС". – Новосибирск, 1999. – 58 с.
31. Сорока Б. С. Низкоэмиссионное сжигание подготовленных газо-воздушных смесей в камере с рециркуляцией продуктов сгорания / Б. С. Сорока, В.А. Згурский, М. Хинкис // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. – Днепропетровск: НППК "Триакон". – 2013. – Вып. 1(12). – С. 368 - 374.
32. Сорока Б. С. Комбинирование способов снижения образования оксидов азота при горении – основное направление обеспечения экологических нормативов / Б. С. Сорока, К. Е. Пьяных, В. А. Згурский, А. П. Апальков // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2000. - №5. – С. 60-69.
33. Шестаков С. М. Технологии сжигания местных видов твердого топлива / С. М. Шестаков, А. Л. Аронов // Новости теплоснабжения. – 2013. – №10. URL: <https://docplayer.ru/54509437-Tehnologii-szhiganiya-mestnyh-vidov-tverdogo-topliva.html>
34. Stanmore B. R. The Burnout Rates of Brown Coal Char Particles in Fluidized Bed Combustors / B. R. Stanmore, K. Jung // Transactions of the Institution of Chemical Engineers. – 1980. –Vol. 58. – P. 66-68.
35. Сажин Б. С. Вихрові пиловловлювачі / Б. С. Сажин, Л. І. Гудим. – Москва: Хімія, 1995. – 194 с.

References

1. Perederii S. “Gazogeneratornye elektrostantsii mirovoi trend?” *LesPromInform*. 2021. №1(155). URL: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=5890>
2. Karapetov A. “Sloevoe szhiganie biotopliva. Obzor tehnologii?”. *LesPromInform*. 2016. №1(115). URL: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=4301>
3. Baskakov A.P., Matsnev V.V., Raspopov I.V. *Kotly i topki s kipiashchim sloem*. Moskva: Energoatomizdat, 1996.
4. Mahorin K.E., Himkis P. A. *Szhiganie topliva v psevdoozhizhennom sloe*. Наукова думка, 1989.
5. Kuchin G.P., Skripko V.L. *Szhiganie nizkosortnykh topliv v psevdoozhizhennom sloe*. Kiev: Tehnika, 1987.
6. Puzyrev E. M. *Issledovanie topochnykh protsessov i razrabotka kotlov dlia nizkotemperaturnogo szhiganiia goriuchikh otkhodov i mestnykh topliv*. Diss. *Altayskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni I.I. Polzunova*, 2003.
7. Redko A.F. *Teploobmen v topkakh s kipiashchim sloem: Uchebnoe posobie*. UMK VO. 1990.
8. Bocharov A.A., Viskin Zh.V. *Problemy teplo- i massoobmena v sovremennoi tekhnologii szhiganiia i gazifikatsii tverdogo topliva*. Minsk, 1988.
9. Riabov G.A., Dik E.P., Soboleva A.N., Soloveva T.E. “Osobennosti protsessov szhiganiia biotopliva v kotlakh s kipiashchim sloem”. *Teploenergetika*. 2005. No 9. P. 54-60.

10. Pitsukha E.A. *Nauchnye osnovy sozdaniia vysokoeffektivnykh tsiklonno-sloevykh topochnykh ustroystv dlia kotlov, rabotaiushchikh na tverdom biotoplive*. Diss. Institut teplo- i massoobmena imeni A. V. Lyikova Natsionalnoy akademii nauk Belarusi. 2019.
11. Pivnenko Yu. A. "Issledovanie protsessa szhiganiya drevesnykh otkhodov v topkakh s kipiashchim sloem". *Ekologiya i promyshlennost*. 2016. No 2. P. 73-76.
12. Redko O. F., Pivnenko Yu. A. "DoslIdzhennia psevdozridzhennia polidispersnykh bInarnykh sistem u topkakh kipliachoho sharu". *VentilyatsIya, osvItlennya ta teplogazopostachannya : nauk.-tehn. zb.* 2017. Vyp. 22. P. 43-48.
- 13; Redko O. F., Redko I. A., Pivnenko Yu. A. «Eksperimentalnye issledovaniia szhiganiia biotopliva v kipiashchem sloe». *VentilyatsIya, osvItlennya ta teplogazopostachannya : nauk.-tehn. zb.* 2017. Vyp. 23. P. 52-60..
14. Riabov G.A., Litun D.S., Pitsukha E.A., Teplitskii Yu. S., Borodulia V. A. «Opyt szhiganiia razlichnykh vidov biomassy v Rossii i Belorussii». *Elektricheskies stantsii*. 2015. No 9(1010). P. 9-17
15. Pchelkin Yu.M. *Kamery sgoraniia gazoturbinnykh dvigatelei*. Mashinostroenie. 1984. 280 p.
16. Sorunzan A., Hohlov D.A., Pleshanov K.A. «Issledovanie protsessov szhiganiia pylevidnogo biotopliva v stesnennykh usloviiah kamer sgoraniia». *Energetika. Tekhnologii budushchego: III Nauch.-tehn. konf. studentov (20 – 22 maia 2020 g., Moskva): Sb. tr. konf.* Izdatelstvo MEI, 2020. P. 187-192.
17. Sidelkovskii N., Yurenev V. N. *Parogeneratory promyshlennykh predpriatii*. Energiia, 1978. – 336 p.
18. Shchukin V.K., Khalatov A.A. *Teploobmen, massoobmen i gidrodinamika zakruchennykh potokov v assimetrichnykh kanalakh*. Mashinostroenie, 1982. 200 p.
19. Redko A., Burda Y., Dzhyoiev R., Redko I., Norchak V., Pavlovskii S., Redko O. "Numerical modeling of peat burning processes in a vortex furnace with countercurrent swirl flows". *Thermal Science*. 2021. Vol. 25. Iss. 3. Part A. pp. 1905-1919. <https://doi.org/10.2298/TSCI190305158R>
20. Redko I.O. TsentralizovanI sistemi teplopostachannya na osnovI udoskonaleniI tehnologIchnih metodIv I sposobIv spalyvannya alternativnih paliv. Diss. abstract. Kyiv National University of Construction and Architecture, 2020.
21. Gorbis Z.R. *Teploobmen i gidrodinamika dispersnykh skvoznykh potokov*. Energiia 1970. 424 P.
22. Khalatov A. A., Kobzar S. G. "Kompiuternye tekhnologii v modernizatsii kotlov i kamer sgoraniia". *Akva-Therm*. 2007, no. 1. pp. 12-15.
23. Alekseenko S. V., Gusev I. N., Yeroshenka V.M., Rabovskii V. B. "Chiselne ta eksperymentalne modeliuвання turbulentnykh techie v topkovykh kamerakh. *Inzhenerno-fIzichnii zhurnal*. 1990. T.5. No 6. P. 948-955.
24. Ustimenko B. P., Dzhakubov K. B., Krol V. O. *Chiselne modeliuвання aerodinamiky i gorinnia v topkovykh tekhnolohichnykh prystroiahk*. Alma-Ata: Nauka, 1986.
25. Askarova A. S., Karpenko E. I., Loktionova I. V., Messerle V. E., Ustimenko A. V. "Optimization of the combustion of power-station technologies". *Thermal Engineering*. 2004. Vol. 51. №6. P. 488–493.
26. Shcholokov V. I., Ladinichev V. V., Liseikin I. D., Todorovich A.V. "Modernizatsiia vodogreynykh vodotrubnykh kotlov tipa PTVM i KVGM". *Novosti teplosnabzheniia*. 2004. No 5 (45). URL: https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=1922
27. Ustimenko B. P., Aliyarov B. K., Abubakirov E. K. *Vogniane modeliuвання pylovuhilnykh topok*. Alma-Ata: Nauka, 1982.
28. Askarova A.S., Bolegenova S.A., Maksimov V.Yu., A. Bekmuhamet, Sh.S. Ospanova «Issledovanie obrazovaniia vrednykh veshchestv v kamere sgoraniia BKZ-75 Shakhtinskoi TETS». *Materialy VIII Vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Gorenie tverdogo topliva» Institut teplofiziki im. S.S. Kutateladze SO RAN, 13–16 noiabria 2012 g. Novosibirsk*. 2012. P. 9.1-9.4.
29. Akhmedov R. B. *Duttevi gazopalnykovi pristroi*. Nedra. 1970.
30. Serant F. A. *Razrabotka i issledovanie koltsevoi topki, ee promyshlennoe vnedrenie i ispytanita na kotle paroproizvoditelnosti 820 t / ch*. Diss. OAO "Sibtehenergo", ZAO "SibKS»YuS, 1999.
31. Soroka B. S., Zgurskii V. A., Hinkis M. «Nizkoemissionnoe szhiganie podgotovlennykh gazo-vozdushnykh smesei v kamere s retsirkuliatsiei produktov sgoraniia». *Sovremennaia nauka: issledovaniia, idei, rezultaty, tekhnologii*. NPVK "Triakon". 2013. Vyp. 1(12). P. 368 - 374.
32. Soroka B. S., Pyanyh K. E., Zgurskii V. A., Apalkov A. P. "Kombinirovaniie sposobov snijeniia obrazovaniia oksidov azota pri goreniie – osnovnoe napravlenie obespecheniia ekologicheskikh normativov." *Ekotekhnologii i resursoberejenie*, no. 5, 2000, P. 60-69.
33. Shestakov S. M., Aronov A. L. «Tehnologii szhiganiia mestnykh vidov tverdogo topliva». *Novosti teplosnabzheniia*. 2013. No10. URL: <https://docplayer.ru/54509437-Tehnologii-szhiganiya-mestnyh-vidov-tverdogo-topliva.html>
34. Stanmore B. R., Jung K. "The Burnout Rates of Brown Coal Char Particles in Fluidized Bed Combustors". *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*. 1980. Vol. 58. P. 66-68.
35. Sazhin B. S., Gudym L. I. *Vykhrovi pylovlovliuvachi*. Himiia, 1995. 194 p.

УДК 62-664.2

Аэродинамические характеристики процесса сжигания опилок в вихревой топке

Р. Л. Джиоев¹, И. А. Редько², А. А. Редько³, Ю. А. Пивненко⁴, Ю. А. Бурда⁵, С. А. Алфьоров⁶, А. В. Приймак⁷

¹асп. Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, г. Харьков, Украина, office@khgorgas.com.ua, ORCID 0000-0003-4046-7038

²д.т.н., проф. Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, г. Харьков, Украина, germes_s2006@ukr.net, ORCID:0000-0002-9863-4487

³д.т.н., проф. Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, г. Харьков, Украина, andrey.ua-mail@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2331-7273

⁴к.т.н., асист. Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, г. Харьков, Украина, pivnenko.yura@gmail.com, ORCID 0000-0002-6675-2649

⁵к.т.н., асист. Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, г. Харьков, Украина, burda.yurii@gmail.com, ORCID 0000-0003-3470-1334

⁶асп. Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, г. Харьков, Украина, sergey.alf312@gmail.com, ORCID 0000-0003-3451-1004

⁷д.т.н., проф. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, 02opriymak@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9515-9879

Аннотация. В настоящее время одним из основных направлений стратегического развития Украины является достижение энергетической независимости. Для реализации этого необходимо внедрять системы использования имеющихся в нашем государстве энергетических ресурсов. Поскольку значительную часть экономической деятельности страны занимает сельскохозяйственная деятельность, применение низкосортных видов топлив, большинство из которых являются отходами именно данной сферы, актуально и выгодно по экономическим и экологическим соображениям. При этом реконструкция котлов, усовершенствование методов и способов сжигания в вихревых топках низкосортных видов топлива позволит существенно сократить потребление импортируемого природного газа и приблизить страну к статусу энергетически независимого государства. При этом на выходе из топки обеспечивается высокая эффективность сепарации частиц, в которых степень выгорания кокса составляет 100%. Значение объемной концентрации частиц $\beta < 3 \cdot 10^{-2}$ характеризует аэродинамический режим движения частиц в топке как режим газовой суспензии. В статье приведены результаты численного исследования поведенческих характеристик процесса сжигания древесных опилок диаметром от $d_{\min}=25$ мкм до $d_{\max}=750$ мкм в вихревой топке со встречными закрученными потоками воздуха. Приведены поля статического давления и абсолютной скорости в топочном объеме. Показано изменение плотности потока, объемной концентрации частиц по высоте топки. Расходная концентрация частиц составляет 0,094 кг/кг воздуха. В ходе выполнения исследований определены основные характеристики процесса сжигания древесных опилок в вихревой топке со встречными закрученными потоками воздуха, а именно: более высокая скорость газов наблюдается в пристенной области в нижней части топки; при увеличении диаметров частиц топлива зона с максимальным содержанием кокса в них перемещается из нижней зоны топки в верхнюю; давление газов изменяется незначительно как по высоте, так и по пересечению топки.

Ключевые слова: сжигание топлива, вихревые топки, сепарация частиц, скорость топливно-воздушной смеси

UDC 62-664.2

Aerodynamic characteristics of the sawdust combustion process in a vortex furnace

R. Dzhyoev¹, I. Redko², A Redko³, Y. Pivnenko⁴, Y. Burda⁵, S. Alferov⁶, O. Priymak⁷

¹ Post-graduate student, Kharkov National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkov, Ukraine, office@khgorgas.com.ua, ORCID: 0000-0003-4046-7038

² Dr Hab., prof. Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkov, Ukraine, germes_s2006@ukr.net, ORCID: 0000-0002-9863-4487

³ Dr Hab., prof. Kharkov National University of Construction and Architecture, Kharkov, Ukraine, andrey.ua-mail@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2331-7273

⁴ Ph.D assistant, Kharkov National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkov, Ukraine, pivnenko.yura@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6675-2649

⁵ Ph.D assistant, Kharkov National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkov, Ukraine, burda.yurii@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3470-1334

⁶Post-graduate student, Kharkov National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkov, Ukraine, sergey.alf312@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3451-1004

⁷Dr. Hab., prof. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, 02opriymak@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9515-9879

Abstract. *The article presents the results of a numerical study of the behavioral characteristics of the process of burning sawdust with a diameter from $d_{min} = 25 \mu m$ to $d_{max} = 750 \mu m$ in a vortex furnace with counter swirling air flows. The fields of static pressure and absolute velocity in the furnace volume are given. The change in flow density, volume concentration of particles along the height of the furnace is shown. Consumption concentration of particles is 0.094 kg / kg of air. Currently, one of the main directions of Ukraine's strategic development is to achieve energy independence. To achieve this, it is necessary to implement systems for the use of energy resources available in our country. Since a significant part of the country's economic activity is occupied by agricultural activities, the use of low-grade fuels, most of which are waste in this area, is relevant and profitable for economic and environmental reasons. Reconstruction of boilers, improvement of methods and ways of combustion in vortex furnaces of low-grade fuels will significantly reduce the consumption of imported natural gas and bring the country closer to the status of energy-independent state. coke burnout is 100%. The value of the volume concentration of particles $\beta < 3 \cdot 10^{-2}$ characterizes the aerodynamic mode of motion of particles in the furnace as the mode of gas suspension. In the course of research, the main characteristics of the process of burning sawdust in a vortex furnace with counter-swirling air flows, namely: higher gas velocity is observed in the near-wall area in the lower part of the furnace; when the diameter of the fuel particles increases, the zone with the maximum coke content in them moves from the lower zone of the furnace to the upper; the gas pressure varies slightly both in height and in the cross section of the furnace.*

Key words: fuel combustion, vortex furnaces, particle separation, speed of the fuel-air mixture

Надійшла до редакції / Received 22.03.2021