

УДК 536.4,662.61

**Калінчак В. В.<sup>1</sup>, Черненко О. С.<sup>2</sup>, Дунаєвська Н. І.<sup>3</sup>, Бондзик Д. Л.<sup>4</sup>**

<sup>1,3,4</sup>Інститут теплоенергетичних технологій НАН України

<sup>2</sup>Одеський національний університет імені І. І. Мечникова

E-mail: [teplophys@onu.edu.ua](mailto:teplophys@onu.edu.ua)

ORCID: <sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0002-9123-2450> <sup>2</sup>

<https://orcid.org/0000-0002-3722-0694>

<sup>3</sup> <https://orcid.org/0000-0003-3271-8204>

<sup>4</sup> <https://orcid.org/0000-0003-3123-1971>

## **Вплив параметрів вдування на характеристики факельного горіння вугілля з високим вмістом летких**

З врахуванням вмісту золи, кінетики виходу летких та гомогенних хімічних реакцій побудована фізико-математична модель горіння вугільного пилу газового вугілля всередині горизонтального реактору постійного діаметру. Враховано зміна розміру, маси і густини частинки при виділення летких газів і вологи; кінетика та тепловиділення в гетерогенних реакцій окислення вуглецю та гомогенних реакціях окислення чадного газу, метану та водню. Модель дозволяє проаналізувати координатні і часові характеристики горіння і самозаймання (температуру частинок і газу; діаметру, маси і густини; концентрації кисню, азоту і оксидів вуглецю; концентрації горючих летких речовин в газовій фазі факелу (метан, чадний газ, водень) від властивостей викопного вугілля. Показано, що весь процес горіння вугільного пилу можна умовно розділити на два етапи: 1) виділення летких і вологи при розігріві частинок; 2) горіння летких, займання і горіння вугільних частинок. Проаналізовано вплив частки кисню і масової витрати повітря на повноту згорання вугільного пилу і газовий склад продуктів згорання. Наведено результати чисельних розрахунків повноти згорання пилу за різних концентрацій кисню, масових витратах вугільного пилу та збагаченого киснем (35%) повітря, початкової температури газової суміші і різних витратах киснево-збагаченого повітря, за умови сталої масової витрати вугільного пилу. Доведено, що зі збільшенням концентрації кисню у дутті і витрати повітря, збагаченого киснем, повнота згорання зростає: при збільшенні кисню від 23% до 35% повнота згорання зростає з 86 до 99 мас. %.

**Ключові слова:** пиловугільний факел, частинки, леткі речовини, волога.

В металургії та теплоенергетиці залишається актуальною задачею в найближчі десятиліття розробка теплоенергетичних технологій ефективного спалювання диспергованого викопного палива і зменшення шкідливих викидів (оксиди азоту, сірки, чадного газу) хімічного та механічного недопалу [1-3], не зважаючи на вимоги скорочення використання викопного палива задля зменшення викидів парникових газів. В теперішніх реаліях, з якими зіштовхнулася в першу чергу промисловість України, доводиться перелаштовуватися від твердих палив, які використовувалися в технологічному процесі тривалий час, на інші, як не придатні до виготовлення коксу. На більшості вітчизняних енергетичних та промислових котлах, що працюють на вугіллі, основним паливом залишається вугілля марки Г (subbituminous coal) [4-5].

Так заміна високоякісного коксу чи антрациту на газове чи буре вугілля потребує зміни параметрів вдування пилу і повітря: дисперсності пилу, температури, тиску та складу кисне-паливного середовища, тощо. Одним із напрямків заміни палива є використання домішок: легкозаймистих видів палива, а також біопалив [6-8].

Експериментальні роботи з дослідження горіння окремих частинок вугілля розміром 50–200 мкм показали, що ключовими параметрами, які визначають швидкість горіння летких речовин та коксового залишку, є концентрація кисню, температура газу та розмір частинок [9]. Подібні дослідження проведено також для частинок шкаралупи волоського горіха в середовищах  $O_2/N_2$  та  $O_2/CO_2$  [10]. Із цих робіт випливає, що час затримки займання для частинок біомаси й вугілля виявляється дуже близьким, а збільшення частки кисню понад 30 об.% не пришвидшує займання через обмеження, пов'язані зі швидкістю виходу летких.

Раціональне та контрольоване спалювання викопного вугілля та відновлювального твердого палива (біомаси) з великим вмістом летких можливе лише за умови детального врахування механізмів тепловиділення та кінетики гомогенних і гетерогенних реакцій у поєднанні з процесами тепло- та масообміну частинок із кисневмісним середовищем. Важливу роль відіграють швидкість піролізу, кількість летких речовин та інтенсивність самоприскорення тепловиділення, що безпосередньо залежить від концентрації кисню [11]. Додатковими факторами є випромінювальний теплообмін і дифузійно-кінетичне співвідношення, значення яких зростають з ростом діаметра частинок.

Моделювання горіння вугільного пилу є доволі поширеною науковою задачею. Відомі вже класичні підходи Хзмаляна, Померанцева. Маловідомим в Україні є огляд горіння вугільного пилу [12], в якому також детально розроблено математичну модель поширення полум'я через суміші вугільного пилу з повітрям.

Загально відомо, що частинки вугілля окислюються і горять дуже складним чином через ряд послідовних стадій. Процес горіння включає гетерогенні (поверхневі) реакції, видалення вологи і летких речовин та подальшу реакції летких компонентів (гомогенні реакції), набухання, розтріскування та інші фізико-хімічні зміни частинок. Склад летких речовин, що виділяються, та швидкість горіння залежать від швидкості нагрівання частинок в нагрітому газі, що робить аналітичний опис процесу надзвичайно складним. В результаті піролізу і хімічних перетворень на поверхні твердих частинок палива виникає стефанівська течія утворюються додаткові газові маси, які мають напрям від частинок – посилюють тепловіддачу, зменшують потік кисню і спричиняють розширення факелу, що не враховується при моделюванні піролізу і горінні диспергованого твердого палива [13-16]. Зміну площі перерізу струменя ( $S = \pi r_{\text{flow}}^2$ ) знаходимо з закону неперервності (збереженню маси), який враховує появу додаткових газових мас:

$$u_g^2 S \frac{\partial \rho_g}{\partial x} = (W_c \pi d^2 + \dot{m}_v + \dot{m}_w) \dot{N} - \rho_g u_g^2 \frac{\partial S}{\partial x},$$

де  $W_c \pi d^2$ ,  $\dot{m}_v$ ,  $\dot{m}_w$  – відповідно, масова швидкість горіння вуглецю, швидкість виходу летких (volatile), швидкість виходу парів води (water)

**Мета даної роботи** є створення фізико-математичної моделі з урахуванням розширення газодисперсного струменю вугільного пилу і встановлення закономірностей піролізу, займання і горіння вугільного пилу з високим вмістом летких речовин і вологи (на прикладі газового вугілля) в нагрітому окиснику, збагаченому киснем. Завданнями роботи стали:

1) проведення аналізу координатних залежностей: температур і похідних температур частинок і газу, знаходження координат стадій нагріву, піролізу, займання і квазістаціонарного горіння; діаметра, густини і маси частинок, знаходження механічного недопалу; концентрацій кисню, азоту, оксидів вуглецю, водяної пари, водню і метану; координатних залежностей маси летких і радіуса газодисперсного струменю вугільного пилу;

2) проведення аналізу впливу початкової концентрації кисню на характеристики факельного горіння вугілля з високим вмістом летких і повноту згоряння вугільного пилу, визначення оптимальних умов вдування

**Кінетика піролізу , виходу летких і вологи з вугільних частинок.** В табл. 1 вказано орієнтовний склад вибраних палив в сухій (індекс d) або сухій беззольній масі (індекс daf). Індекс r вказує на частку в робочій масі палива [12]. Таким чином маємо, що на коксовий залишок ( $C^r = 1 - W_w^r - A^r - S^r - V_{gv}^r$ ) для вугілля  $C^c = 48.0$  мас.%. Згідно класичним уявленням в процесі нагрівання і горіння частинки вугілля і деревини її густина зменшується: спочатку виходить фізична волога(перша стадія), потім(на другій стадії) в результаті піролізу виходять леткі горючі речовини, які окислюються і згоряють в газовій фазі за законами гомогенних реакцій. На третій стадії залишається коксо-зольний залишок (ККЗ)[14]. Під час нагрівання вугільних частинок починають виділятися леткі речовини і волога. Зазвичай наголошується, що склад цих речовин різний для вугілля різного рангу, природи і ізоморфізму. Вони переважно складаються з  $CH_4$ ,  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$  та смол (близько 5 мас.%). Вихід газів неперервно зростає зі збільшенням температури частинок, а смол зменшується. Основними леткими газами є водень (26-60 об.%) та метан (24-54 об.%). Деяку частину займають гази  $CO$  та  $CO_2$  (6-7 і 2-3 об. %). В мас.% відносна частка метану в летких речовинах значно більша за частки інших летких газів.

Густина частинки палива визначається її складом, а саме вмістом вуглецю, золи, вологи та летких газів В процесі нагріву і піролізу руйнуються енергетичні зв'язки між вуглецевим каркасом і леткими речовинами і найбільш активні покидають частинку палива. В результаті з часом зменшується густина частинки  $\rho_p(\tau)$  палива за законом:

**Табл. 1.** Технічний та елементний склад вугілля Г (в мас. %) та летких

$W^r$	$A^d/A^r$	$S^d/S^r$	$V_{vg}^{daf}/V_{vg}^r$	$\Phi_{CO_2}$	$\Phi_{CO}$	$\Phi_{H_2}$	$\Phi_{CH_4}$
волога	зола	сірка	леткі	склад летких (об./ мас.%)			
11.6	4.9 / 4.3	3.5 / 3.1	39.3 / 33.0	2.2/ 10.0	6.8/ 20.0	55.0/ 11.5	35.0/ 58.5

$$\frac{\pi d^3}{6} \rho_p (\tau) = m_{W,0} - m_W(\tau) + m_{V,0} - m_V(\tau) + m_{C,0} - m_C(\tau) + m_A,$$

де  $m_W(\tau)$ ,  $m_V(\tau)$  – маса вологи та летких, які вже вийшли з частинки,  $m_C(\tau)$  – маса вуглецю, яка вигоріла;  $m_{W,0}, m_{V,0}, m_{C,0}, m_A$ , – максимальна (початкова) маса вологи та летких, маса вуглецю і маса золи. Максимальна маса летких горючих і вологи, вуглецю і золи в частинці палива визначається

$$m_{V,0} = V_{V,0} \frac{\pi d_0^3 \rho_{p,0}}{6}, m_{W,0} = W_0 \frac{\pi d_0^3 \rho_{p,0}}{6}, m_{C,0} = C_0 \frac{\pi d_0^3 \rho_{p,0}}{6}, m_A = A \frac{\pi d_0^3 \rho_{p,0}}{6},$$

$$V_{V,0} + W_0 + C_0 + A = 1,$$

де  $V_{V,0}$ ,  $W_0$  – відносна початкова маса летких і вологи;  $C_0$ ,  $A$  – відносні початкові маса вуглецю і золи, що визначаються за даними технічного і елементарного складу частинки палива (табл.1);  $d_0, \rho_{p,0}$  – початковий діаметр і густина частинки палива. Початкову масу вологи визначаємо через масу летких  $m_{W,0} = m_{V,0} W_0 / V_{V,0}$ .

Початковий склад летких ( $CH_4, H_2, CO, CO_2$ ) задаємо у вигляді

$$\varphi_{CO_2} + \varphi_{CO} + \varphi_{CH_4} + \varphi_{H_2} = 1.$$

Тоді максимальна(початкова) маса окремої і-тої леткої компоненти ,яка міститься в окремої частинці палива

$$m_{V,0,CO_2} = \varphi_{CO_2} m_{V,0}, m_{V,0,CO} = \varphi_{CO} m_{V,0}, m_{V,0,CH_4} = \varphi_{CH_4} m_{V,0}, m_{V,0,H_2} = \varphi_{H_2} m_{V,0}.$$

Швидкість виділення летких і вологи відбувається за активаційним механізмом, тому вона залежить від температури за законом Ареніуса та відносної частки вже виділених речовин

$$u_g \frac{dm_{V_i}}{dx} = (m_{V_i,0} - m_{V_i}) k_{v,0} \exp\left(-\frac{E_{V_i}}{RT}\right), m_{V_i}(x=0) = 0,$$

$$u_g \frac{dm_W}{dx} = (m_{W,0} - m_W) k_{W,0} \exp\left(-\frac{E_W}{RT}\right), m_W(x=0) = 0,$$

$$m_{V_i} = \varphi_i m_{V,0} = \varphi_i V_0 \frac{\pi d_0^3 \rho_{p,0}}{6}, m_{W,0} = W_0 \frac{\pi d_0^3 \rho_{p,0}}{6},$$

де  $x, W_0$  – координата(м);  $u_g$  – швидкість газової суміші(м/с);  $k_{v,0}, k_{W,0}$  – предекспонента летких і вологи (1/с);  $E_{V_i}, E_W$  енергія активації відповідно летких і вологи(Дж/моль);  $T$  – температура частинки палива (К);  $R = 8.314$ (Дж/моль К)універсальна газова стала.

Значення кінетичних констант утворення вологи і діоксиду вуглецю приймаються, як  $E_W = 21.6$  кДж/моль,  $k_{W,0} = 0.1$  с<sup>-1</sup>. Константи процесу утворення інших летких характеризуються значно більшою енергією активації  $E = 101.7$  кДж/моль,  $k_{v,0} = 10^5$  с<sup>-1</sup> [15, С. 221].

В інженерних розрахунках іноді достатньо використовувати простий однокомпонентний підхід, згідно якому кінетичні параметри для летких і вологи приймаються однаковими:

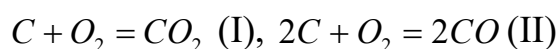
$$u_g \frac{dm_V}{dx} = (m_{V,0} - m_V) k_{V,0} \exp\left(-\frac{E_V}{RT}\right), \quad \dot{m}_V = u_g \frac{dm_V}{dx}, \quad m_V(x=0) = 0. \quad (1a)$$

Тоді швидкість виділення вологи з вугільних частинок визначається через швидкість виділення летких

$$\dot{m}_W = \dot{m}_V W_0 / V_0. \quad m_W(x=0) = 0. \quad (1b)$$

Кінетичні параметри цього процесу в умовах горіння пиловугільного факелу [14]:  $E_V = 29.3$  кДж/моль,  $k_{V,0} = 14.2 \cdot 10^2$  с<sup>-1</sup>. Питома теплоємність натурального палива також залежить від складу і температури. Її знаходимо по емпіричній залежності: для кам'яного вугілля  $c_p = 960 + 1.46(T - 273)$  [15].

**Хімічна кінетика гетерогенних реакцій і масобмін.** Основними гетерогенними реакціями на поверхні вугільних частинок є паралельні екзотермічні хімічні реакції вуглецю з киснем



та послідовна ендотермічна реакція вуглецю з діоксидом вуглецю



В газовій фазі є гомогенні реакції окислення чадного газу, водню та метану:  $2CO + O_2 = 2CO_2$  (IV),  $2H_2 + O_2 = 2H_2O$  (V),  $CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$  (VI).

Швидкості гетерогенних хімічних реакцій визначаються через концентрації кисню та діоксиду вуглецю на поверхні частинки:

$$W_{1,S} = k_{01} \rho_g Y_{O_2,S} \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right), \quad W_{2,S} = k_{02} \rho_g Y_{O_2,S} \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right),$$

$$W_{3,S} = k_{03} \rho_g Y_{CO_2,S} \exp\left(-\frac{E_3}{RT}\right), \quad W_C = \frac{M_C}{M_{O_2}} (W_{1,S} + 2W_{2,S}) + \frac{M_C}{M_{CO_2}} W_{3,S},$$

де  $W_{1,S}, W_{2,S}$ , – швидкості екзотермічних реакцій (I) і (II) по кисню, кг  $O_2 / m^2 c$ ;  $W_{3,S}$  – швидкість реакції (III) по діоксиду вуглецю кг  $CO_2 / m^2 c$ ;  $W_C$  – швидкість витрати вуглецю кг  $C / m^2 c$ ;  $k_{01}, k_{02}, k_{03}$  – відповідно предекспонента м/с;  $E_1, E_2, E_3$  – відповідно енергія активації реакцій (I), (II), (III) Дж/моль;  $Y_{O_2,S}, Y_{CO_2,S}$ , відповідно відносні масові концентрації кисню і діоксиду вуглецю на поверхні частинки;  $\rho_g$  – густина газу, кг/м<sup>3</sup>;  $M_C, M_{O_2}, M_{CO_2}$  – відповідно, молярна маса вуглецю, кисню і діоксиду вуглецю.

Для визначення кінетичних констант гетерогенних реакцій використано з припущення про зв'язок енергій активацій і передекспоненціальних множників:

$$k_{0i} = k^* \exp\left[\frac{E_i}{RT^*}\right], \quad E_2 = 1.1E_1, \quad E_3 = 2.2E_1,$$

де  $k^* = 100$  м/с,  $T^* = 2500$  К.

Концентрації (масові частки) кисню, вуглекислого газу і оксиду вуглецю поблизу поверхні частинок визначаються інтенсивністю масопереносу:

$$j_{O_2,s} = -\beta \rho_g (Y_{O_2,s} - Y_{O_2}) = (k_1 + k_2) \rho_g Y_{O_2,s}, Y_{O_2,s} = \frac{\beta}{\beta + (k_1 + k_2)} Y_{O_2},$$

$$j_{CO_2,s} = \beta \rho_g (Y_{CO_2,s} - Y_{CO_2}) = \frac{M_{CO_2}}{M_{O_2}} k_1 \rho_g Y_{O_2,s} - k_3 \rho_g Y_{CO_2,s},$$

$$Y_{CO_2,s} = \frac{M_{CO_2}}{M_{O_2}} \frac{k_1}{(\beta + k_3)} Y_{O_2,s} + \frac{\beta}{(\beta + k_3)} Y_{CO_2},$$

$$j_{CO,s} = \beta \rho_g (Y_{CO,s} - Y_{CO}) = \frac{2M_{CO}}{M_{O_2}} k_2 \rho_g Y_{O_2,s}, Y_{CO,s} = \frac{2M_{CO}}{M_{O_2}} \frac{k_2}{\beta} Y_{O_2,s} + Y_{CO}$$

$$\beta = \frac{D_g Nu}{d}, D_g = D_{g0} \left( \frac{T_g}{T_0} \right)^{1.75} \frac{P_0}{P}, \lambda_g = \lambda_{g0} \left( \frac{T_g}{T_0} \right)^{0.75}, \rho_g = \rho_{g0} \frac{T_0}{T_g} \frac{P}{P_0}$$

Швидкості гомогенної реакції (IV) окислення чадного газу, витрати кисню і виходу вуглекислого газу визначаються через концентрацію чадного газу:

$$W_{CO_2} = \frac{M_{CO_2}}{M_{CO}} k_4 \rho_g Y_{CO}, \quad W_{O_2} = \frac{M_{O_2}}{2M_{CO}} k_4 \rho_g Y_{CO}.$$

Швидкість реакції(V) окислення водню визначається першим порядком по водню

$$W_{H_2} = k_5 \rho_g Y_{H_2}.$$

Витрати кисню і виходу води реакції(V)

$$W_{H_2O} = \frac{M_{H_2O}}{M_{H_2}} k_5 \rho_g Y_{H_2}, \quad W_{O_2} = \frac{M_{O_2}}{2M_{H_2}} k_5 \rho_g Y_{H_2}.$$

Швидкості реакції(VI) окислення метану, витрати кисню і виходу води та вуглекислого газу

$$W_{CO_2} = \frac{M_{CO_2}}{M_{CH_4}} k_6 \rho_g Y_{CH_4}, \quad W_{CH_4} = k_6 \rho_g Y_{CH_4}, \quad W_{O_2} = \frac{M_{O_2}}{2M_{CO}} k_6 \rho_g Y_{CH_4}.$$

Залежності константи гомогенних реакцій(IV) - (VI) від температури газу визначаються законом Ареніуса

$$k_4 = k_{04} \exp\left(-\frac{E_4}{RT_g}\right), k_5 = k_{05} \exp\left(-\frac{E_5}{RT_g}\right), k_6 = k_{06} \exp\left(-\frac{E_6}{RT_g}\right)$$

Кінетичні параметри цих реакцій мають різні значення у різних авторів [16]. В даній роботі використані наступні кінетичні параметр (табл. 2).

**Табл.2** Кінетичні і термохімічні параметри вибраних реакцій при горіння вугільного пилу марки Г

Реакція	I	II	III	IV	V	VI
$E_i$ , кДж/моль	100	110	220	96.3	105	35
$k_{0i}$ , м/с (* в 1/с)	$1.0 \cdot 10^4$	$1.6 \cdot 10^4$	$2.6 \cdot 10^6$	$7.05 \cdot 10^{6*}$	$1.13 \cdot 10^{8*}$	$5.1 \cdot 10^{7*}$
$Q_i$ , МДж/кгO <sub>2</sub>	12.34	6.84	4.0	10.3	120.5	50.2

**Тепломасообмін системи.** Для опису теплообміну необхідно врахувати тепловиділення в кожній з гомогенних і гетерогенних реакціях, тепловитрати на випаровування вологи, тепломасообмін між частинками і газовим середовищем та променевий теплообмін [13]. Координатна залежність температури частинки палива описується диференціальним рівнянням термодинаміки :

$$\frac{c_p \rho_p d}{6} \cdot u_g \frac{dT}{dx} = (1-A)q_{ch,S} - q_{g,S} - q_{vap} - q_w, \quad T(x=0) = T_0, \quad (2)$$

$$q_{g,S} = \frac{2\lambda_g}{d}(T - T_g), \quad q_w = \varepsilon\sigma(T^4 - T_w^4), \quad q_{ch,S} = Q_1 W_{1,S} + Q_2 W_{2,S} - Q_3 W_{3,S},$$

$$q_{vap} = L \cdot \dot{m}_w, \quad \dot{m}_w = (m_{w,0} - m_w)k_{w0} \exp\left(-\frac{E_w}{RT}\right).$$

Діаметр частинки зменшується за рахунок гетерогенних реакцій на її поверхні(I)- (III). Реагування в порах і зменшення густини в цих процесах знехтуємо. Враховуючи наявність золи, диференціальне рівняння для діаметру частинки представимо у вигляді:

$$\frac{u_g(1-A)\rho_p}{2} \frac{d(d)}{dx} = -W_{C,S}, \quad d(x=0) = d_0, \quad (3)$$

$$W_{C,S} = \frac{M_C}{M_{O_2}}(W_{1,S} + 2W_{2,S}) + \frac{M_C}{M_{CO_2}}W_{3,S},$$

$$W_{1,S} = k_{01}\rho_g Y_{O_2,S} \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right), \quad W_{2,S} = k_{02}\rho_g Y_{O_2,S} \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right), \quad W_{3,S} = k_{03}\rho_g Y_{CO_2,S} \exp\left(-\frac{E_3}{RT}\right).$$

Концентрації (масові частки) кисню і вуглекислого газу поблизу поверхні частинок визначаються як:

$$Y_{O_2,S} = \frac{\beta}{\beta + (k_1 + k_2)} Y_{O_2}, \quad Y_{CO_2,S} = \frac{M_{CO_2}}{M_{O_2}} \frac{k_1}{(\beta + k_3)} Y_{O_2,S} + \frac{\beta}{(\beta + k_3)} Y_{CO_2},$$

$$\beta = \frac{2D_g}{d}, \quad D_g = D_{g0} \left(\frac{T_g}{T_0}\right)^{1.75} \frac{P_0}{P}, \quad \lambda_g = \lambda_{g0} \left(\frac{T_g}{T_0}\right)^{0.75}, \quad \rho_g = \rho_{g0} \frac{T_0}{T_g} \frac{P}{P_0}.$$

Зміна середньої температури газу відбувається за рахунок теплообміну з реагуючими частинками, тепловиділенням при протіканні гомогенних хімічних реакцій та теплообміну з навколишнім середовищем ( $i = 4 - CO, i = 5 - CH_4, i = 6 - H_2$ ):

$$c_{pg}\rho_g u_g \frac{dT_g}{dx} = \frac{q_{g,S}\pi d^2}{S} \frac{\dot{N}}{u_g} + \sum Q_i W_i - q_{g,w}, \quad T_g(x=0) = T_{g0}, \quad (4)$$

$$q_{gw} = \frac{2}{d_{lub}} \left( \alpha_w (T_g - T_w) + \varepsilon\sigma(T_g^4 - T_w^4) \right), \quad q_{gS} = \alpha(T - T_g) = \frac{2\lambda_g}{d}(T - T_g),$$

$$\sum Q_i W_i = Q_{CO(V)} W_{CO} + Q_{H_2(V)} W_{H_2} + Q_{CH_4(V)} W_{CH_4}, \quad W_i = k_{0,i}\rho_g Y_{O_2} \exp\left(-\frac{E_i}{RT_g}\right).$$

При записі диференційних рівнянь масообміну для концентрацій кисню, діоксиду вуглецю, оксиду вуглецю, водню, вологи і метану врахуємо, що масова частка в газовій суміші метану, водню, водяного пару, вуглекислого та чадного газу додатково збільшується за рахунок виділення летких речовин та вологи під час нагрівання.

**Середня концентрація кисню** в основному визначається масопереносом кисню до поверхні частинок та зникненням в гомогенних реакціях(IV) - (VI) :

$$-\rho_g u_g \frac{dY_{O_2}}{dx} = W_{O_2(IV)} + W_{O_2(V)} + W_{O_2(VI)} + \frac{j_{O_2s} \pi d^2 \dot{N}}{S u_g}, \quad Y_{O_2}(x=0) = Y_{O_2,0}. \quad (6)$$

$$j_{O_2,s} = \beta \rho_g (Y_{O_2} - Y_{O_2,s}), \quad Y_{O_2,s} = \frac{\beta}{(\beta + k_1 + k_2)} Y_{O_2}.$$

Диференційне рівняння для зміни середньої концентрації вуглекислого газу враховує його появу в гомогенній реакції (IV), появу і зникнення в гетерогенних реакціях(I)- (III) та появу в результаті піролізу частинок палива

$$\rho_g u_g \frac{dY_{CO_2}}{dx} = \frac{M_{CO_2}}{M_{CO}} k_4 \rho_g Y_{CO} + \frac{j_{CO_2s} \pi d^2 \dot{N}}{S u_g} + \frac{\phi_{CO_2} \dot{m}_v \dot{N}}{S u_g}, \quad Y_{CO_2}(x=0) = 0. \quad (7)$$

$$j_{CO_2s} = \beta \rho_g (Y_{CO_2,s} - Y_{CO_2}), \quad Y_{CO_2,s} = \frac{M_{CO_2}}{M_{O_2}} \frac{k_1}{(\beta + k_3)} Y_{O_2,s} + \frac{\beta}{(\beta + k_3)} Y_{CO_2},$$

$$\dot{m}_v = (m_{v,0} - m_v) k_{v,0} \exp\left(-\frac{E_v}{RT}\right),$$

Чадний газ витрачається в гомогенній реакції (IV), з'являється у гетерогенній реакції (2) та при піролізі. Тому диференційне рівняння для зміни середньої концентрації чадного газу

$$\rho_g u_g \frac{dY_{CO}}{dx} = -k_4 \rho_g Y_{CO} + \frac{j_{COs} \pi d^2 \dot{N}}{S u_g} + \frac{\phi_{CO} \dot{m}_v \dot{N}}{S u_g}, \quad Y_{CO}(x=0) = 0, \quad (8)$$

$$j_{COs} = \beta \rho_g (Y_{CO,s} - Y_{CO}), \quad Y_{CO,s} = \frac{2M_{CO}}{M_{O_2}} \frac{k_2}{\beta} Y_{O_2,s} + Y_{CO},$$

Водень витрачається в гомогенній реакції (V) та з'являється при піролізу

$$\rho_g u_g \frac{dY_{H_2}}{dx} = -k_5 \rho_g Y_{H_2} + \frac{\phi_{H_2} \dot{m}_v \dot{N}}{S u_g}, \quad Y_{H_2}(x=0) = 0. \quad (9)$$

Водяний пар з'являється в газовій фазі як продукт реакцій (V) і (VI) та в процесі піролізу. Тому враховуючи (1б), маємо

$$\rho_g u_g \frac{dY_{H_2O}}{dx} = \frac{2M_{H_2O}}{M_{H_2}} k_5 \rho_g Y_{H_2} + \frac{2M_{H_2O}}{M_{CH_4}} k_6 \rho_g Y_{CH_4} + \frac{\dot{m}_v W_0 \dot{N}}{V_0 S u_g}, \quad Y_{H_2O}(x=0) = 0, \quad (10)$$

Метан витрачається в реакції(VI) та з'являється при піролізу частинок палива

$$\rho_g u_g \frac{dY_{CH_4}}{dx} = -\frac{2M_{O_2}}{M_{CH_4}} k_6 \rho_g Y_{CH_4} + \frac{\phi_{CH_4} \dot{m}_v \dot{N}}{S u_g}, \quad Y_{CH_4}(x=0) = 0. \quad (11)$$

При виділенні летких речовин в процесі піролізу, а також згоранні вуглецевого залишку в газовому просторі між частинками з'являється додаткова маса газів, що повинна або призводити до збільшення тиску, або розширення газового струменя. Припускаючи, що тиск залишається сталим, зміну площі перерізу струменя ( $S = \pi r_{\text{flow}}^2$ ) знаходимо з закону збереження маси по мірі розповсюдження факелу:

$$\rho_g u_g^2 \frac{\partial S}{\partial x} = (W_c \pi d^2 + \dot{m}_V + \dot{m}_W) \dot{N} - u_g^2 S \frac{\partial \rho_g}{\partial T_g} \frac{\partial T_g}{\partial x}, \quad S(x=0) = S_0, \quad (12)$$

$$W_c = \frac{M_c}{M_{O_2}} (W_{1,S} + 2W_{2,S}) + \frac{M_c}{M_{CO_2}} W_{3,S}, \quad \dot{m}_V = (m_{V,0} - m_V) k_{V,0} \exp\left(-\frac{E_V}{RT}\right).$$

Перший доданок визначає швидкість газовиділення з частинок по мірі руху факела, другий – розширення струменю при нагріванні.

**Результати і їх аналіз.** Розрахунки рівнянь(1)-(12) проводились для горизонтального реактора постійного діаметру. Вугільний пил з розмірами 60 мкм, масовою витратою  $G_c = 0.1$  кг/с і швидкістю подачі 20 м/с вдувається разом з повітрям, збагаченим киснем (35 об. %). Кількість вугільних частинок, які влітають в одиницю часу, визначаються через початкову густину вугілля (з леткими речовинами і вологою) згідно формули:

$$\dot{N} = \frac{6G_c}{\rho_p \pi d_0^3}.$$

Для частинок діаметром 60 мкм це близько  $6.8 \cdot 10^9$  1/с. Температура системи (зовнішні стінки реактора та газова суміш) поза факелом  $T_w = 1800$  К.

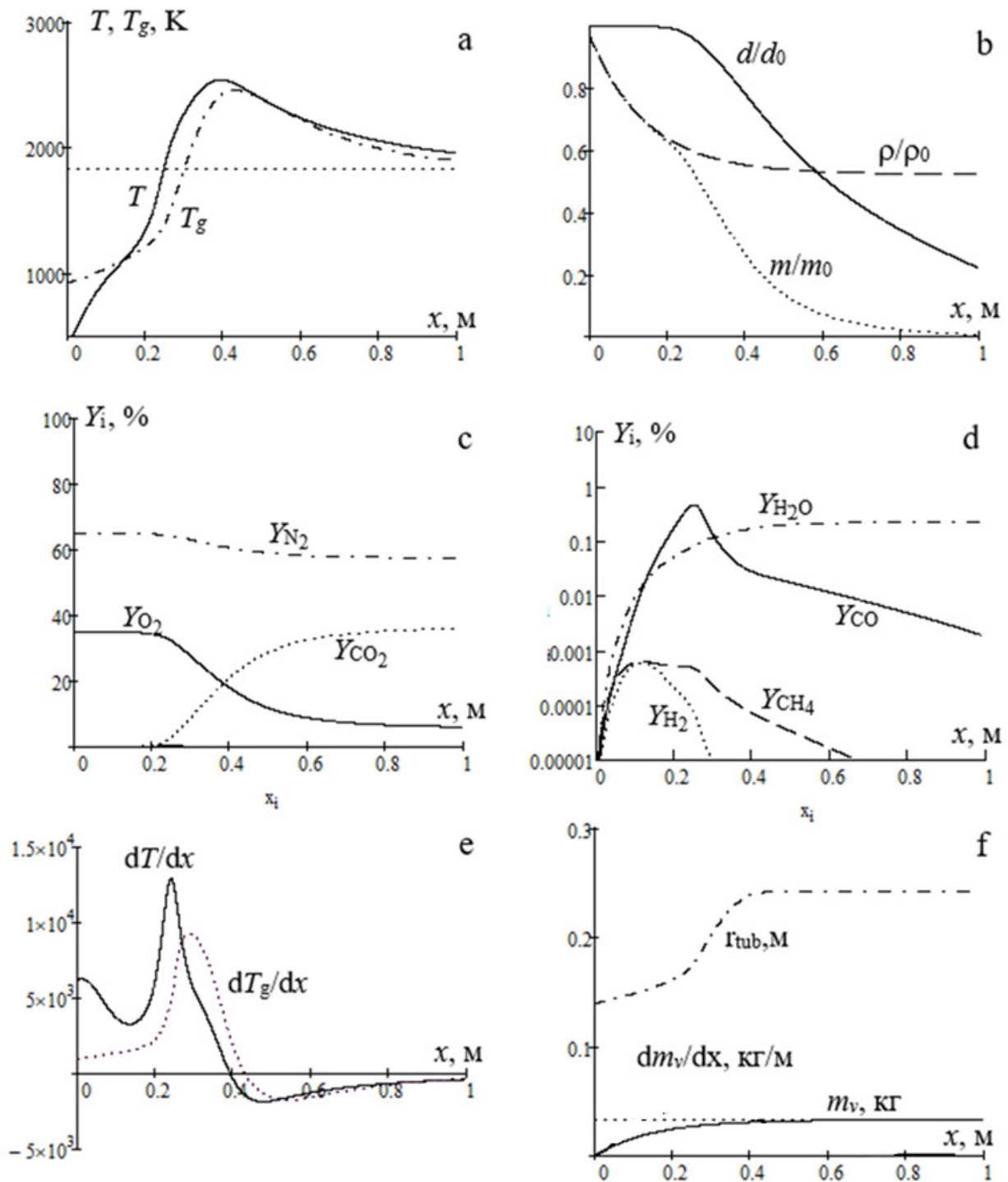
Для оцінки необхідної кількості повітря для повного згорання вугільного пилу звернемо увагу на дані табл. 1. Маємо масову частку вугілля 48 %, чадного газу  $20\% \cdot 33\% = 6.6\%$ , метану  $58.5\% \cdot 33\% = 19.3\%$ , водню  $11.5\% \cdot 33\% = 3.8\%$ . Для їх повного згорання необхідна наступна маса кисню:

$$G_{O_2} = G_c \left( 0.48 \frac{M_{O_2}}{M_c} + 0.066 \frac{M_{O_2}}{2M_{CO}} + 0.193 \frac{2M_{O_2}}{M_{CH_4}} + 0.038 \frac{M_{O_2}}{2M_{H_2}} \right) = 0.24 \text{ кг/с.}$$

Для повітря при масовій частці кисню 35% маємо  $G_{air} = 0.68$  кг/с. При 923 К і атмосферному тиску густина повітря  $\rho_{air} = 0.304$  кг/м<sup>3</sup>, відповідно, об'ємна витрата повітря  $\dot{V}_{air} = G_{air} / \rho_{air} = 1.31$  м<sup>3</sup>/с. Початковий радіус струменю(stream) знаходимо з  $\dot{V}_{air} = u_{air} \pi r_{tub}^2$  і  $r_{tub} = 0.14$  м. Такі значення масової витрати і розміри труби відповідають характерним розмірам однієї фурми. Кількість вугільних частинок, які влітають в одиницю часу, визначаються через початкову густину вугілля (з леткими речовинами і вологою) згідно формули:

$$\dot{N} = \frac{6G_c}{\rho_p \pi d_0^3}.$$

Для частинок діаметром 60 мкм це близько  $6.8 \cdot 10^9$  1/с.



**Рис. 1.** Ілюстрація займання і горіння монодисперсного вугільного пилу  $T_0 = 623$  К в збагаченому киснем ( $Y_{O_2,0} = 35\%$ ) нагрітому повітрі ( $T_{g0} = 923$  К). Характерні профілі а) температури частинок і газу; б) відносного діаметру, густини і маси частинок; с, d) концентрацій компонент в газовій фазі факелу, е) похідних температури по координаті, f) радіусу факелу та частки виходу летких речовин.  $d = 60$  мкм,  $G_{air} = 0.68$  кг/с,  $G_c = 0.1$  кг/с.

На рис. 1 подано результати моделювання процесу горіння пилу вугілля марки Г. Частинки надходили в камеру нагрітими до температури  $T_b = 623$  К.

На початковій стадії частинки (температура частинки менше температури газу) інтенсивно прогриваються в потоці гарячого повітря починають активно виділяти вологу і леткі гази (рис 1а). У процесі піролізу, виділення летких компонентів та води маса та густина частинок поступово зменшуються, тоді як їхній діаметр залишається майже незмінним (рис 1б). При цьому концентрація кисню, CO, CO<sub>2</sub> майже не підвищується, що свідчить що хімічні реакції окиснення ще не підключилися (рис 1с, рис 1д).

На рис 1д представлені профілі концентрацій метану, водню, водяної пари і чадного газу. Метан і водень, що виходять із частинок, реагують практично одразу на їхній поверхні, що є типовим для частинок такого розміру. Тому концентрація цих газів у суміші невелика, тоді як вміст CO, CO<sub>2</sub> та водяної пари підвищується, що спричиняє повільніший розігрів газової фази.

Після того як температура частинок зрівнюється з температурою газу, відбувається займання та подальше горіння коксового залишку. Вигорання частинок супроводжується падінням їхньої густини та підвищенням загальної повноти згорання вугілля. Інтенсивність виділення газів зростає, що призводить до розширення діаметру перерізу факела майже вдвічі (рис 1f).

Рис. 1е необхідний для сигналізації характерних етапів поведінки температури частинок і газу та виділення стадії інертного нагріву, стадії самоприскорення хімічних реакцій і стадії квазістаціонарного горіння і повільного погасання. Мінімум на часовій залежності похідної температури вказує на завершення часу прогріву, максимум – завершення затримки займання, другий мінімум – початок погасання частинок. Швидкість зменшення розміру вугільних частинок після початку погасання починає поступово спадати. Густина практично не змінюється, адже така мала частинка практично повністю втрачає леткі і вологу (рис 1б). Повнота згорання із-за кубічної залежності від діаметру наближається до нуля значно швидше, ніж відносний діаметр.

В даній моделі після згорання пилу газова суміш переважно містить азот, вуглекислий газ, водяну пару та залишки кисню.

У табл. 3 наведено результати чисельних розрахунків повноти згорання пилу за різних концентрацій кисню, масових витратах вугільного пилу та збагаченого киснем повітря, температури газової суміші. та різних об'ємних витрат киснево-збагаченого повітря, за умов сталої масової витрати вугільного пилу. В таблиці виділені значення параметрів дуття, які залишаються сталими при зміні деякого вибраного параметра. Довжина факела бралася рівною 1 м.

Зі збільшенням концентрації кисню у дутті від 23 % (повітря) до 35 % повнота згорання зростає з 86 до 99 мас. %. Зола зазвичай, яка не згорає, доволі легко від'єднується від частинок. За вибраних умов кисень практично повністю витрачається у гетерогенних та гомогенних реакціях. Підвищення його частки приводить до більшої кількості утвореного CO<sub>2</sub> у продуктах горіння. Аналіз показує, що концентрація CO залишається низькою, оскільки він догорає в реакції (IV).

**Таблиця 3.** Вплив початкових параметрів дуття на повноту згорання вугільного пилу і газовий склад продуктів згорання в факелі довжиною 1 м.

<i>Вплив початкової концентрації кисню</i>						
$Y_{O_2b}$ , %	$T_{gf}$ , K	$d_f/d_o$ , %	$m_f/m_o$ , %	$Y_{O_2f}$ , %	$Y_{CO_2f}$ , %	$Y_{H_2O_f}$ , %
<b>35</b>	1894	22.0	0.6	6.0	36.3	0.22
29	1928	47.4	5.6	3.2	32.6	0.20
23	1943	65.3	13.9	1.9	27.1	0.18
<i>Вплив масової витрати повітря збагаченого киснем</i>						
$G_{air}$ , кг/с	$u_g$ , м/с	$d_f/d_o$ , %	$m_f/m_o$ , %	$Y_{O_2f}$ , %	$Y_{CO_2f}$ , %	$Y_{H_2O_f}$ , %
0.3	12	51.2	7.00	0	63.9	0.47
0.4	16	54.5	7.00	0	44.9	0.36
<b>0.5</b>	<b>20</b>	22.0	0.60	6.0	36.3	0.22
0.7	28	8.1	0.03	18.8	20.2	0.12
<i>Вплив масової витрати вугільного пилу</i>						
$G_C$ , кг/с	$T_{gf}$ , K	$d_f/d_b$ , %	$m_f/m_o$ , %	$Y_{O_2f}$ , %	$Y_{CO_2f}$ , %	$Y_{H_2O_f}$ , %
0.09	1880	10.3	0.06	8.4	33.3	0.20
<b>0.10</b>	1894	22.0	0.6	6.0	36.3	0.22
0.11	1904	31.3	1.6	4.3	38.4	0.24
0.12	1909	38.9	3.1	2.8	40.3	0.27
<i>Вплив температури дуття збагаченого киснем повітря</i>						
$T_{g0}$ , K	$u_g$ , м/с	$d_f/d_o$ , %	$m_f/m_o$ , %	$Y_{O_2f}$ , %	$Y_{CO_2f}$ , %	$Y_{H_2O_f}$ , %
623	14	6.04	0.01	6.6	35.6	0.08
723	16	12.5	0.10	6.5	35.7	0.12
823	18	17.7	0.29	6.3	35.9	0.17
<b>923</b>	20	22.0	0.60	6.0	36.3	0.22

Початкова температура повітря (масова частка кисню  $Y_{O_2b} = 35\%$ ) суттєво впливає на початок стадії займання і горіння вугільного пилу. Її зниження до низьких температур є небажаним. Однак результати показали, що зниження температури в цілому покращує згорання пилу. Цей дивний результат можна пояснити деякими причинами. По перше, при сталій масовій витраті повітря і радіусі вихідної труби зниження температури повітря призводить до зменшення швидкості його подачі. І тому час нагрівання і горіння збільшується, а отже і повнота згорання в межах вибраної довжини факелу також збільшується. По друге, теплообмін з тілами поза факелом, які мають високу температуру, допомагає розігріти холодне повітря і вугільні частинки до температури, коли горіння летких речовин стає суттєвим для самостійного розігріву частинок.

Результат впливу масової витрати вугільного пилу очікуваний. Чим більше вугільного пилу при інших незмінних параметрах, тим менша повнота згорання, менша частка кисню. І навпаки.

Вплив масової витрати повітря більш складніший. При інших незмінних параметрах системи її збільшення призводить до підвищення швидкості подачі повітря. А також збільшується загальна кількість кисню в системі. Останній фактор є переважаючим і тому повнота згорання підвищується.

**Висновки.** Побудована фізико-математична модель, яка дозволяє розрахувати оптимальні умови і характеристики стійкого горіння пиловугільного факелу з частинками зі значною часткою летких речовин і вологи. Модель дозволяє проаналізувати координатні і часові характеристики горіння і самозаймання (температуру частинок і газу; діаметру, маси і густини; концентрацій кисню, азоту і оксидів вуглецю; концентрації горючих летких речовин в газовій фазі факелу(метан, чадний газ, водень)від властивостей викопного вугілля з дисперсністю, характерною для пиловугільного факелу.

#### Література:

1. *Ступак Ю.О., Хохлова Т.С.* Дослідження горіння пилоподібного твердого палива та вплив окремих його властивостей на характер протікання початкових стадій горіння // “Modern problems of metallurgy” № 27 – 2024. С.120-140. DOI: 10.34185/1991-7848.2024.01.09
2. *Гарбер В., Головань В.* Використання ПВП – пиловугільного палива в металургії та на ГЗК України // Гірничий вісник, вип. 110, 2022 С.107-113.
3. *Семенов Ю. С., Подкоритов О. Л., Горупаха В. В., Семіон І. Ю. та інші.* Нові наукові і прикладні результати досліджень ефективності використання пиловугільного палива при виробництві чавуну і випалі вапняку // Метал та лиття України, vol. 28, 2020. № 2 (321). <https://doi.org/10.15407/steelcast2019.10.064>
4. *Дунаєвська Н.І., Бондзик Д.Л., Нехамін М.М., Мірошніченко Є.С., Безценний І.В., Євтухов В.Я., Щудло Т.С.* Технологія спільного спалювання антрациту та твердого біопалива в пиловугільних котлах ТЕС і ТЕЦ // Naukainnov. 2020. Т. 16, № 5. С. 86-96. <https://doi.org/10.15407/scin16.05.086>
5. *Chernyavskyy M., Miroshnychenko Y., Provalov O., Kosyachkov O.* Conversion of anthracite boiler units of chp plants for combustion of sub-bituminous coal in the war conditions // *Energy Technologies & Resource Saving*, 2023, 76(3), 3-20. <https://doi.org/10.33070/etars.3.2023.01>
6. Co-combustion of solid fuel: opportunities, advantages and application prospect/ Scientific editor *Nataliya Dunayevska*; Thermal Energy Technology Institute of NAS of Ukraine. – Kyiv: Akadem periodyka, 2025. – 220 p. <https://doi.org/10.15407/akademperiodyka.541.220>
7. *S.V. Syrodoy, J.A. Kostoreva, A.A. Kostoreva, L.I. Asadullina* Ignition of wood and coal particle mixtures in conditions of steam and water boiler furnaces // *Journal of the Energy Institute*. Volume 93, Issue 2, April 2020, Pages 443-449 <https://doi.org/10.1016/j.joei.2019.07.007>
8. Відновлювані джерела енергії: видання друге, доповнене / За заг. ред. *С. О. Кудрі.* Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2024. 492 с.
9. *Li, T.; Chen, H.; Вуһт, В.* Experimental Assessment of the Effects of Gas Composition on Volatile Flames of Coal and Biomass Particles in Oxyfuel Combustion Using Multi-Parameter Optical Diagnostics. *Processes* 2025, 13, 1817. <https://doi.org/10.3390/pr13061817>
10. *Abdul Gani, Z. F., et al.*: Online Monitoring of the Burning Characteristics of single pulverized coal particle in O<sub>2</sub> /N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> /CO<sub>2</sub> environments // *Thermal science: Year 2024*, Vol. 28, №. 3B, pp. 2605-2614
11. *Qianyun Chen, Dingyi Qin, Jing Li, Zhaohui Liu, Martin Schiemann* Ignition characteristics of isolated coal particles under pressurized oxy-fuel combustion conditions //

- Combustion and Flame 279 (2025) 114276 <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2025.114276>
12. *Krazinski, John L.; Buckius, Richard O. ;Krier, Herman* Coal dust flames: a review and development of a model for flame propagation // *Proo. Energy Combust Sci.*, Vol 5~ pp. 31 71. Pergamon Press Ltd. 1979. DOI: 10.1016/0360-1285(79)90018-2.
  13. *Handbook of Coal Analysis.* <https://doi.org/10.1002/9781119037699>
  14. *Калинчак В.В. Черненко А.С.* Теплофизика горения пылеугольного топлива (монография). – Одеса. ОНУ им. И. И. Мечникова. – 2017. – 225 с. <https://dspace.onu.edu.ua/handle/123456789/24761>
  15. Учебное пособие для вузов. – Под ред. *В. В. Померанцева.* – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с
  16. *Ksenia Yu. Vershinina, Lyrshchikov S. Yu., Strizhak P. A.* Thermal decomposition and oxidation of coal processing waste// *Thermal Science.* 2017. 22(00):311-311. DOI: 10.2298/TSCI171023311V

***Kalinchak V. V., Chernenko A. S., Dunayevska N. I., Bondzyk D. L.***  
**Influence of blowing parameters on the characteristics of coal flame  
combustion with high volatile matter content**

SUMMARY

*A physical and mathematical model of pulverized coal combustion of gas coal in a horizontal constant-diameter reactor has been developed, taking into account ash content, volatile release kinetics, and homogeneous chemical reactions. The model considers changes in particle size, mass, and density during the release of volatiles and moisture, as well as the kinetics and heat release of heterogeneous carbon oxidation reactions and homogeneous oxidation reactions of carbon monoxide, methane, and hydrogen.*

*The model makes it possible to analyze spatial and temporal characteristics of combustion and self-ignition, including particle and gas temperatures; particle diameter, mass, and density; concentrations of oxygen, nitrogen, and carbon oxides; and concentrations of combustible volatile species in the gas phase of the flame (methane, carbon monoxide, and hydrogen), depending on the properties of fossil coal.*

*It is shown that the entire process of pulverized coal combustion can be conditionally divided into two stages: (1) release of volatiles and moisture during particle heating, and (2) combustion of volatiles, ignition, and combustion of coal particles. The influence of oxygen fraction and air mass flow rate on the completeness of coal dust combustion and the gas composition of combustion products is analyzed.*

*The results of numerical simulations of combustion completeness are presented for various oxygen concentrations, mass flow rates of coal dust and oxygen-enriched air (35%), initial gas mixture temperatures, and different flow rates of oxygen-enriched air under conditions of a constant coal dust mass flow rate. It is demonstrated that an increase in oxygen concentration in the blast and in the flow rate of oxygen-enriched air leads to higher combustion completeness: when the oxygen concentration increases from 23% to 35%, the combustion completeness rises from 86 to 99 wt.%.*

**Keywords:** *pulverized coal flame, particles, volatile matter, moisture.*