

вання квантов, скорости их рождения, и влияние на этот процесс потенциала межатомного взаимодействия

$$P(T, p) = D \left(e^{-2A\Delta r(T, p)} - e^{-A\Delta r(T, p)} \right),$$

$$\Delta T(T, p) = \frac{r(T, p) - r_0}{r_0}.$$

И, самое очевидное, получить зависимость степени черноты данного тела от температуры $\beta(\omega_i, T) = \frac{P_p(\omega_i, T)}{P(\omega_i, T)}$, для любого диапазона частот $\Delta\omega'_{ip}$, $\Delta\omega''_{ip}$ и температуры.

Исходя из вышесказанного, излучательную способность любого вещества можно записать, используя формулу Планка (1) (адаптированную) в следующем виде:

$$\varepsilon_p(\omega, T) = \beta(\omega, T) \cdot \frac{2\hbar\omega^3}{4\pi c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} - 1}, \quad (11)$$

где $\beta(\omega, T)$ — степень черноты данного вещества в соответствующем диапазоне частот, при данной температуре T .

Данное выражение (11) можно использовать для расчета теплоемкости данного вещества при различных температурах T . И как следствие, исследовать на базе метода структурных единиц, взаимосвязь физических параметров: r_0 — межатомного равновесного расстоя-

ния; D — энергии связи, A — постоянной характеризующей межатомное взаимодействие [5], c_a — атомарной теплоемкости, от термодинамических параметров p , v , T .

ЛИТЕРАТУРА

1. Киттель Ч., Найт У., Рудерман М., Парселл Э., Крауфорд Ф., Вихман Э., Рейф Ф., Портис А. Берклевский курс физики Т. IV. Квантовая физика. М. Наука. — 1977. — 415 с.
2. Планк М. [К теории распределения энергии излучения нормального спектра](#). Избранные научные труды. Русский пер. из сборника под ред. А. П. Виноградова, стр. 251.
3. Мочалов А.А., Евфимко К.Д., Шаповал Н.А. Особенности математического моделирования динамических процессов в твердых телах с микроструктурой. Математичне моделювання. Науковий журнал Дніпродзержинського державного технічного університету. — 2013. — №2. — С. 29—32.
4. Мочалов А.А., Евфимко К.Д. Исследование влияния высокого давления на макроскопические параметры вещества. Весник СУМДУ 2008. — № 1. — С. 156—160.
5. Мочалов А.А., Евфимео К.Д., Гайша А.А. Исследование зависимости параметров потенциала Морзе и температуры и давления для металлов. Ж. Металлы и литье Украины. — 2009. — № 11—12. — С. 64.

пост. 07.10.2015

Математичні основи алгоритму функціонування системи оптимізації витрати пиловугільного палива на домену плавку

Б.П. ДОВГАЛЮК, В.О. ДУКА, Д.М. ЧЕРНИШ

Дніпродзержинський державний технічний університет

Розроблено математичні основи алгоритму функціонування системи оптимізації витрати пиловугільного палива на домену плавку.

Разработаны математические основы алгоритма функционирования системы оптимизации расхода пылеугольного топлива на доменную плавку.

The mathematical basis of the algorithm of the system to optimize the flow of pulverized coal in the blast furnace.

Постановка задачі. Розробити математичні основи алгоритму функціонування системи оптимізації витрати пиловугільного палива на домену плавку.

Результати роботи. В алгоритмі функціонування системи оптимізації витрати пиловугільного палива (ПВП) необхідно контролювати показники ефективності використання ПВП.

Це коефіцієнт заміни коксу, кг/кг: [1],

$$K_3 = \frac{g_{m(p)} + 23605C^p\eta_{co} + 121000H^p\eta_{n2} + 13400W^p\eta_{n2}}{1,8667c_k(5250 + 12648 \cdot \eta_{co})} \quad (1)$$

кількість заміненого коксу пиловугільним паливом:

$$E_{k,nen} = K_3 V_{nen}, \text{ кг/хв.} \quad (2)$$

та сума прибутку від використання ПВП, грн /г:

$$PO = E_{k,nen}C_k - V_{nen}C_{nen} - V_0C_0 + (P_f - P_3)E, \quad (3)$$

де V_{nen} — кількість ПВП, що вдувається у піч, кг/хв.;

η_{co}, η_{n2} — ступінь використання оксиду вуглецю та водню, відповідно, частка одиниці;

c_k — вміст вуглецю в коксі, частка одиниці;

C^p, H^p, W^p — вміст в ПВП, відповідно, вуглецю, водню та води, кг/кг;

C_k, C_{nen}, C_0 — ціна коксу, ПВП та технологічного кисню;

E — умовно постійні витрати на чавун;

P_f, P_3 — фактична і задана продуктивність печі.

Між цими показниками та кількістю паливної добавки існує екстремальна залежність, яка є основою алгоритму функціонування системи оптимізації витрати ПВП.

При рівному ході печі і витраті ПВП, що установилася, збільшуючи його кількість на 5—10 г/м³, визначають оптимальну кількість ПВП, яка відповідає максимально можливому значенню показника *ПО*. Коливання значення *E_{к,нен}* компенсують зміною маси коксу у подачі.

Під час функціонування системи доцільно забезпечити автоматизований контроль окиснення елементів чавуну на фурмах. Для цього з усередненої інформації за 10 хв визначають: температуру кожного фурменного вогнища *t_{φ,i}* та всієї фурменої зони *t_φ* (як середнє значення *t_{φ,i}*); теоретичну температуру горіння *t_m*; кількість в горновому газі *CO*; різницю між теоретичною температурою горіння і температурою фурмених вогнищ:

$$\Delta t = t_{\phi} - t_m \quad (4)$$

через 20 хв за кожні 10 хв визначають приріст Δt :

$$\Delta = \Delta t(t) - \Delta t(t-1). \quad (5)$$

Якщо $\Delta < -30$ °С, то вважають, що збільшилось окиснення елементів чавуну на фурмах.

Якщо $\Delta > -30$ °С, то вважають, що зменшилось окиснення елементів чавуну на фурмах.

Визначають міру зміни окиснення заліза Δz (в %) за формулою:

$$\Delta z = -0,75\Delta. \quad (6)$$

Теоретичну температуру горіння (°С) визначають за формулою: [1]

$$t_m = \frac{5250CO_2 + W_{к\delta} + h'_c}{C_{co} \cdot CO_2 + C_H \cdot H_\delta + C_N \cdot N_\delta}, \quad (7)$$

де *C_{co}*, *C_H*, *C_N* — теплоємність відповідних складових горнового газу, кДж/(м³·град.);

CO₂, *H_δ*, *N_δ* — кількість *CO*, *H₂* та азоту, що утворюються в горновому газі, м³/м³ кд;

W_{кδ} — тепломісткість комбінованого дуття, кДж/м³кд., визначається:

$$W_{к\delta} = C_\delta(t_\delta - \Delta t_\lambda \lambda) + v_{нен}(t_{нен} - 13,4W^P - 121,4S^P), \quad (8)$$

де *t_δ* — температура нагрітого дуття, °С;

t_{нен} — температура пиловугільного палива, °С;

C_δ — теплоємність нагрітого дуття, кДж/(м³·град.);

C_{нен} — теплоємність пиловугільного палива, кДж/(г·град.);

λ — вологість дуття, г/м³;

W^P, *S^P* — вміст у пиловугільному паливі води та сірки, частка одиниці маси;

v_{нен} — витрата пиловугільного палива, г/м³;

Δt_λ — зниження температури дуття, еквівалентне витраті тепла на розкладання в горні печі г пари води. Його значення для температури дуття 1000, 1100, 1200 та 1300 °С відповідно дорівнює: 9,55; 9,45; 9,35; 9,31 °С [1];

h'_c — тепломісткість вуглецю коксу, який горить на фурмах, кДж/м³кд., визначають:

$$h'_c = 0,536(CO_2 - 0,0018667v_{нен}C^P) \times (1,482t_m - 466,83), \quad (9)$$

де *v_{нен}* — витрата пиловугільного палива в дутті, г/м³ дуття;

C^P — вміст у пиловугільному паливі вуглецю, частка одиниці маси.

При окисненні заліза на фурмах температуру горіння, °С визначають за формулою: [1]

$$t_{FeO} = \frac{5250CO_2(1-z) + 12047,83zCO_2 + W_{к\delta} + h''_c}{C_{co} \cdot CO_2(1-z) + C_H \cdot H_\delta + zCO_2 \cdot C_{FeO} + C_N \cdot N_\delta}, \quad (10)$$

де *z* — частка *CO* горнового газу, яка умовно витрачається на окиснення заліза за *CO + Fe = FeO + C*;

Тепломісткість вуглецю коксу, який горить на фурмах (*h''_c*, кДж/м³кд), визначають:

$$h''_c = 0,536[CO_2(1-z) - 0,0018667v_{нен}C^P] \times (1,482t_m - 466,83). \quad (11)$$

Теплота утворення *FeO* складає 12047,83 кДж/м³.

Контролювати коливання процесу окиснення елементів чавуну на фурмах можна за інформацією про теоретичну температуру горіння і температуру фурмених вогнищ, яку необхідно контролювати спеціальними датчиками. При цьому доцільно, щоб ці датчики відображали реальну температуру. В таких випадках зміна окиснення елементів чавуну на фурмах буде супроводжуватися зміною різниці між температурою фурмених вогнищ і теоретичною температурою горіння.

Контроль температури фурмених вогнищ не завжди забезпечено. В таких випадках необхідно контролювати температуру в шахті печі за допомогою спеціальних зондів *T_z*, а коливання процесу вторинного окиснення елементів чавуну на фурмах визначати за приростом температури в шахті та порівнянням його з приростом теоретичної температури і зміною суми (*CO + CO₂*) в колошниковому газі.

Склад колошникового газу необхідно контролювати мало інерційними газоаналізаторами з незначним часом запізнення (до 1 хв), оскільки зразу ж після окиснення заліза на фурмах через 10—20 хв починається його пряме відновлення.

Системою також доцільно забезпечити автоматизований контроль втрат тепла з охолоджуючою водою та колошниковим газом. Кількість тепла, що витрачається з охолоджувальною водою визначають [2]:

для верхньої частини печі

$$Q_1 = \sum_{i=1}^6 G_i \Delta t_i c_e, \quad \text{кДж/хв}; \quad (12)$$

для нижньої частини печі

$$Q_2 = \sum_{j=1}^n G_j \Delta t_j c_e, \quad \text{кДж/хв.}, \quad (13)$$

де *G_i* — кількість води, що проходить через *i*-й холодильник верхньої частини печі, кг/хв;

G_j — кількість води, що проходить через *j*-й холодильник нижньої частини печі, кг/хв;

Δt_i — різниця температури вихідної і вхідної води *i*-го холодильника верхньої частини печі, °С;

Δt_j — різниця температури вихідної і вхідної води j -го холодильника нижньої частини печі, °С;
 c_{θ} — теплоємність води, кДж/(кг·°С);
 v — кількість холодильників верхньої частини печі;
 n — кількість холодильників нижньої частини печі.

Кількість тепла, що витрачається з колошниковим газом [2]:

$$Q_{кз} = V_{кз} t_{кз} c_{кз}, \quad \text{кДж/хв.}, \quad (14)$$

де $t_{кз}$ — температура колошникового газу, °С;

$c_{кз}$ — теплоємність колошникового газу, кДж/(м³·°С);

$V_{кз}$ — вихід колошникового газу, м³/хв, його значення визначають:

$$V_{кз} = V_{скз} + 0,01\Delta H_2 V_{скз} M^3 / \text{хв}, \quad (15)$$

де $0,01\Delta H_2 V_{скз}$ — кількість водяної пари в колошниковому газі, що утворилася в зоні непрямого відновлення, м³/хв;

$V_{скз}$ — вихід сухого колошникового газу, м³/хв.

Кількість водяної пари в колошниковому газі визначають за такою методикою [1]. Розраховують: кількість кисню в м³ комбінованого дуття, м³:

$$O_{\theta} = [\omega(10,001244\lambda) + 0,000622\lambda] + v_{nen}(0,0007O^P + 0,000622W^P); \quad (16)$$

кількість оксиду вуглецю у горновому газі:

$$CO_2 = 2 \times O_{\theta}, \quad \text{м}^3/\text{м}^3 \text{ комбінованого дуття (к.д.);} \quad (17)$$

кількість азоту у м³ комбінованого дуття:

$$N_{\theta} = (1 - \omega)(1 - 0,001244\lambda) + 0,0008 \times v_{nen} N^P, \quad \text{м}^3; \quad (18)$$

кількість водню у м³ комбінованого дуття, який надходить у піч з вологою дуття, пиловугільним паливом та коксом, м³/м³:

$$H_{\theta} = 0,001244\lambda + (CO_2) / \psi + v_{nen}(0,0112H^P + 0,001244 \times W^P), \quad (19)$$

де ψ — об'ємне відношення газифікованого вуглецю до водню у коксі;

кількість горнового газу, який утворюється із м³ комбінованого дуття:

$$V_{rr} = CO_2 + N_{\theta} + H_{\theta}, \quad \text{м}^3/\text{м}^3 \text{ к.д.}; \quad (20)$$

кількість водню у горновому газі на 100 м³ сухого колошникового газу (скг):

$$\Sigma H_2 = \frac{H_{\theta} \times N_2}{N_{\theta}}, \quad \text{м}^3/100\text{м}^3 \text{ скг}; \quad (21)$$

кількість водню, що перейшла у воду в зоні непрямого відновлення:

$$\Delta H_2 = \Sigma H_2 - H_2, \quad \text{м}^3/100\text{м}^3 \text{ скг}; \quad (22)$$

кількість водяної пари в колошниковому газі, що утворилася в зоні непрямого відновлення:

$$\Sigma H_2 O = 0,01\Delta H_2 V_{скз}, \quad \text{м}^3/\text{хв}, \quad (23)$$

де O^P — вміст кисню у пиловугільному паливі, частка одиниці маси;

λ — вологість дуття, г/м³;

ω — вміст кисню у дутті, частка одиниці об'єму;

W^P — вміст води у пиловугільному паливі, частка одиниці маси;

v_{nen} — витрата пиловугільного палива, г/м³ к.д.;

N^P — вміст азоту у пиловугільному паливі, частка одиниці маси;

ψ — об'ємне відношення газифікованого вуглецю до водню у коксі (для коксу із Донбаського вугілля $\psi = 25$);

H^P — вміст водню у пиловугільному паливі, частка одиниці маси;

N_2 — вміст азоту в колошниковому газі, %;

H_2 — вміст водню у колошниковому газі, %.

Втрати тепла визначають на кг чавуну, що виплавляється (P_M , кг/хв):

$$q_1 = Q_1 / P_M, \quad \text{кДж/кг}, \quad (24)$$

$$q_2 = Q_2 / P_M, \quad \text{кДж/кг}, \quad (25)$$

$$q_{кз} = Q_{кз} / P_M, \quad \text{кДж/кг}. \quad (26)$$

З урахуванням коливання втрат тепла з колошниковим газом та охолоджувальною водою визначають нові показники для оперативного контролю теплового стану[1]:

$$M_{кр} = M - q_1 - q_2 - q_{кз}; \quad (27)$$

$$M_{1кр} = M_1 - q_1(t - \tau) - q_2 - q_{кз}(t - \tau); \quad (28)$$

$$T_{нкр} = T_n - q_2, \quad (29)$$

де τ — час опускання матеріалів зони непрямого відновлення в горн печі, години.

Продуктивність печі можна визначити з інформації про кількість чавуну, що виплавляється із шихти однієї подачі $Ч$ та кількість завантажених подач за годину N [1]:

$$P_M = Ч \times N / \sum_{i=1}^N t, \quad \text{кг/хв}, \quad (30)$$

де N — кількість подач шихти, які завантажені у піч за календарну годину;

$t_{n,i}$ — час сходу шихти i -ї подачі, хв.

Значення хвилинної продуктивності можна досить точно контролювати з інформації про кількість газифікованого кисню шихти O_u та окисненість шихти O_q [1]:

$$P_M = 1,43 \frac{O_u}{O_q}, \quad \text{кг/хв}. \quad (31)$$

Газифікований кисень шихти у колошниковому газі O_u визначати з інформації про склад та кількість колошникового газу (м³/хв):

$$O_u = 0,01[0,5(CO_2 + \Delta H_2) + 0,5(CO + CO_2) - \beta \cdot N_2] V_{скз}, \quad (32)$$

де ΔH_2 — кількість води, яка перейшла у воду в зоні непрямого відновлення:

$$\Delta H_2 = \Sigma H_2 - H_2, \quad \text{м}^3/100\text{м}^3 \text{ скг}; \quad (33)$$

ΣH_2 — кількість водню у горновому газі, м³/100м³ скг.

Окисненість шихти O_q визначати з інформації про хімічний склад та кількість шихтових матеріалів в одній подачі:

$$O_q = O_{um} / Ч, \quad \text{кг } O_2 / \text{кг чавуну}, \quad (34)$$

де O_{um} — кількість газифікованого кисню із шихти однієї подачі, кг;

$Ч$ — кількість чавуну, який виплавляється із шихти однієї подачі, кг. Значення $O_{ун}$ та $Ч$ визначати із наступних співвідношень:

$$O_{ун} = 0,222A_2FeO + 0,43(A_2Fe - 0,778A_2FeO) + 0,43KЖFe_{жс} + Ч(1,14[Si] + 0,291[Mn] + 1,291[P]) + 0,5)0,85KS_KЧ[S]) + 0,727ИCO_{2кр} - 0,43PFe_n; \quad (35)$$

$$Ч = (A_2 \times Fe + K \times Ж \times Fe_{жс} + Д \times Fe_{\delta} - \Pi \times Fe_n) / Fe_{\epsilon}, \quad (36)$$

де A_2 — маса рудної частини шихти у подачі, кг;

K — маса коксу у подачі, кг;

Π — винос колошникового пилу, кг/подачу;

$И$ — маса вапняку у подачі, кг;

$Д$ — маса металобрухту у подачі, кг;

$Ж$ — вміст золи у коксі, частка одиниці маси;

Fe , FeO — вміст заліза та його оксиду у рудній частині шихти, частка одиниці маси;

Fe_{ϵ} , Fe_{δ} , Fe_n , $Fe_{жс}$ — вміст заліза, відповідно, у чавуні, металобрухті, колошниковому пилу та у золі коксу, частка одиниці маси;

$CO_{2кр}$ — вміст вуглекислоти у вапняку, частка одиниці маси;

$[Si]$, $[S]$, $[Mn]$, $[P]$ — вміст у чавуні, відповідно, кремнію, сірки, марганцю та фосфору, частка одиниці маси;

S_K — вміст сірки у коксі, частка одиниці маси;

0,222 — частка кисню у FeO ;

0,778 — частка заліза у FeO ;

0,727 — частка кисню у CO_2 ;

0,43 — відношення маси кисню до маси заліза у Fe_2O_3 ;

1,14 — відношення маси кисню до маси кремнію у SiO_2 ;

0,291 — відношення маси кисню до маси марганцю у MnO ;

1,291 — відношення маси кисню до маси фосфору у P_2O_5 ;

0,85 — кількість сірки коксу, яка переходить у шлак та чавун, частка одиниці маси;

0,5 — частка маси газифікованого кисню від маси сірки при її ошлакуванні за реакцією $FeS + CaO = Fe + CaS + 0,5O_2$.

Висновки. За допомогою наведеного в статті математичного алгоритму можливо визначити основні параметри доменної печі, необхідні для автоматизованого контролю ефективності використання та оптимізації кількості пилувугільного палива.

ЛІТЕРАТУРА

1. Довгалюк Б.П. Автоматизована система керування технологічними процесами доменної плавки. Дніпродзержинськ: — ДДТУ, 2009. — 245 с.
2. Довгалюк Б.П. Вплив втрат тепла з охолоджувальною водою і колошниковим газом на тепловий режим плавки. / Б.П. Довгалюк, Р.В. Волошин // Математичне моделювання. — 2013. — № 1 (28). — С. 64—67.

пост. 30.11.2015

Вычисление максимальных абсолютных погрешностей округления чисел в IEEE-стандарте

И.И. ЖУЛЬКОВСКАЯ, О.А. ЖУЛЬКОВСКИЙ

Днепродзержинский государственный технический университет

В статье рассмотрены особенности стандартных способов округления чисел с плавающей запятой при вычислениях на компьютере, а также точность представления чисел с плавающей запятой. Получены формулы для вычисления максимальных абсолютных погрешностей округления чисел, представленных в базовых форматах стандарта *IEEE 754*.

У статті розглянуто особливості стандартних способів округлення чисел з плаваючою комою під час обчислень на комп'ютері, а також точність представлення чисел з плаваючою комою. Отримані формули для обчислення максимальних абсолютних похибок округлення чисел, представлених в базових форматах стандарту *IEEE 754*.

The article describes the features of the standard methods of rounding floating point numbers in the calculations on the computer, precision floating-point numbers. In the article obtained the formulas for calculating the maximum absolute round off errors of numbers, presented in the basic format of the *IEEE 754* standard.

Общая характеристика проблемы. Одним из наиболее доступных методов исследования объектов и процессов, происходящих во всех сферах человеческой деятельности, является математическое моделирование. Источниками ошибок в процессе математического моделирования могут быть погрешности исходной математической модели, неверный выбор численных методов и алгоритмов, а также вычислительные ошибки.

Вычислительные ошибки возникают в связи с точностью представления действительных чисел в памяти ЭВМ при вводе данных или при проведении арифметических операций.

К особенностям машинной арифметики можно отнести конечность набора действительных чисел и ограниченность диапазона их изменения. Это, в результате, приводит к следующим последствиям: полученное