

## Вплив втрат тепла з охолоджувальною водою і колошниковим газом на тепловий режим плавки

Б. П. ДОВГАЛЮК, Р. В. ВОЛОШИН

Дніпродзержинський державний технічний університет

Коливання перепаду температури вихідної і вхідної води на холодильниках на 1 – 3 °С та температури колошникового газу на 10 – 20 °С викликає зміну витрати тепла на 250 кДж/кг чавуну і більше, що суттєво впливає на тепловий стан плавки і якість чавуну. Розроблена математична модель безперервного контролю теплового стану плавки з урахуванням втрат тепла.

Колебание перепада температуры входящей и выходящей воды на холодильниках на 1 - 3 °С и температуры колошникового газа на 10 - 20 °С вызывает изменение затраты тепла на 250 кДж/кг чугуна и больше, что существенно влияет на тепловое состояние плавки и качество чугуна. Разработана математическая модель непрерывного контроля теплового состояния плавки с учетом потерь тепла.

Oscillation of over fall of temperature of initial and entrance water on refrigerators on 1-3 °С and the temperatures of top gas on 10-20 °С causes change of charges of heat on to a 250 kDg/kg cast-iron and anymore, that substantially influences on the thermal state of melting and quality of cast-iron. The mathematical model of continuous control of the thermal state of melting is worked out taking into account defervescences.

**Постановка проблеми.** Аналіз ефективності функціонування АСК ТП доменних печей показує, що отримати бажані результати по прогнозуванню теплового стану печі ще не вдавалося. Одна із основних причин - не враховуються коливання втрат тепла з охолоджувальною водою і колошниковим газом [1].

**Мета роботи.** Промодельовати і дослідити вплив втрат тепла з охолоджувальною водою і колошниковим газом на тепловий стан плавки.

**Основна частина.** Кількість тепла, що витрачається з охолоджувальною водою можна визначити:

для верхньої частини печі

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

для нижньої частини печі

$$Q_2 = \sum_{j=1}^n G_j \Delta t_j c_{\text{в}}, \text{ кДж/хв.}, \quad (2)$$

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;

$\Delta t_i$  - різниця температури вихідної і вхідної води  $i$ -го холодильника верхньої частини печі, °С;

$\Delta t_j$  - різниця температури вихідної і вхідної води  $j$ -го холодильника нижньої частини печі, °С;

$c_{\text{в}}$  - теплоємність води, кДж/(кг·°С);

$\nu$  - кількість холодильників верхньої частини печі;

$n$  - кількість холодильників нижньої частини печі.

Кількість тепла, що витрачається з колошниковим газом

$$Q_{\text{кз}} = V_{\text{кз}} t_{\text{кз}} c_{\text{кз}}, \text{ кДж/хв.}, \quad (3)$$

де  $t_{\text{кз}}$  - температура колошникового газу, °С;

$c_{\text{кз}}$  - теплоємність колошникового газу, кДж/(м<sup>3</sup>·°С);

$V_{\text{кз}}$  - вихід колошникового газу, м<sup>3</sup>/хв,

його значення визначають

$$V_{\text{кз}} = V_{\text{скз}} + 0,01 \Delta H_2 V_{\text{скз}} \text{ м}^3/\text{хв}, \quad (4)$$

де  $0,01 \Delta H_2 V_{\text{скз}}$  - кількість водяної пари в колошниковому газі, що утворилася в зоні непрямого відновлення, м<sup>3</sup>/хв;

$V_{\text{скз}}$  - вихід сухого колошникового газу, м<sup>3</sup>/хв.

Кількість водяної пари в колошниковому газі визначають за такою методикою [2, 3]. Розраховують: кількість кисню в м<sup>3</sup> комбінованого дуття

$$O_{\text{о}} = [\omega(1-0,001244\lambda) + 0,000622\lambda](1-\delta) + v_{\text{нат}}(0,0007O^{\text{п}} + 0,000622W^{\text{п}}), \text{ м}^3; \quad (5)$$

кількість оксиду вуглецю у горновому газі

$$CO_2 = 2 \cdot O_{\text{о}}, \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ комбінованого дуття (к.д.);} \quad (6)$$

кількість азоту у м<sup>3</sup> комбінованого дуття

$$N_{\text{о}} = (1-\omega)(1-0,001244\lambda)(1-\delta) + 0,0008 \cdot v_{\text{нат}} N^{\text{п}}, \text{ м}^3 \quad (7)$$

кількість водню у м<sup>3</sup> комбінованого дуття, який надходить у піч з вологою дуття, природним газом, пиловугільним паливом та коксом

$$H_{\text{о}} = 0,001244\lambda(1-\delta) + \mu \cdot \delta + (CO_2 - \gamma \cdot \delta) / \psi + v_{\text{нат}}(0,0112H^{\text{п}} + 0,001244 \cdot W^{\text{п}}), \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ к.д.}; \quad (8)$$

кількість горнового газу, який утворюється із м<sup>3</sup> комбінованого дуття,

$$V_{\text{гг}} = CO_2 + N_{\text{о}} + H_{\text{о}}, \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ к.д.}; \quad (9)$$

кількість водню у горновому газі на 100 м<sup>3</sup> сухого колошникового газу (скз)

$$\Sigma H_2 = \frac{H_{\text{о}} \times N_{\text{о}}}{N_{\text{о}}}, \text{ м}^3/100\text{м}^3 \text{ скз}; \quad (10)$$

кількість водню, що перейшла у воду в зоні непрямого відновлення

$$\Delta H_2 = \Sigma H_2 - H_2, \text{ м}^3/100\text{м}^3 \text{ скз}; \quad (11)$$

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

$$\Sigma H_2 O = 0,01 \Delta H_2 V_{\text{скз}} \text{ м}^3/\text{хв}; \quad (12)$$

де  $O^{\text{п}}$  - вміст кисню у пиловугільному паливі, частка одиниці маси;

$\delta$  - вміст у комбінованому дутті природного газу, частка одиниці об'єму;

$\lambda$  - вологість дуття, г/м<sup>3</sup>;

$\omega$  - вміст кисню у дутті, частка одиниці об'єму;

$W^{\text{п}}$  - вміст води у пиловугільному паливі, частка одиниці маси;

$v_{\text{нат}}$  - витрата пиловугільного палива, г/м<sup>3</sup> к.д.;

$N^p$  - вміст азоту у пиловугільному паливі, частка одиниці маси;

$\mu, \gamma$  - кількість водню та вуглецю, які утворюються в горні після розкладання  $m^3$  природного газу,  $m^3/m^3$ ;

$\psi$  - 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 доцільно визначати на  $kg$  виплавленого чавуну ( $P_m$ ,  $kg/xв$ ):

$$q_1 = Q_1/P_m, \text{ кДж/кг}; \quad (13)$$

$$q_2 = Q_2/P_m, \text{ кДж/кг}; \quad (14)$$

$$q_{кз} = Q_{кз}/P_m, \text{ кДж/кг}; \quad (15)$$

Продуктивність печі  $P_m$  можна визначити з інформації про кількість чавуну, що виплавляється із шихти однієї подачі ( $Ч$ ) та кількість завантажених подач за годину:

$$P_m = Ч \times N / \sum_{i=1}^N t_{n,i}, \text{ кг/хв}, \quad (16)$$

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

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

Значення продуктивності можна визначити також за інформацією про кількість газифікованого кисню шихти ( $O_{ш}$ ) та окисненість шихти ( $O_{ш}$ ) [2, 3]:

$$P_m = 1,43 \frac{O_{ш}}{O_{ш}}, \text{ кг/хв}; \quad (17)$$

Газифікований кисень шихти у колошниковому газі  $O_{ш}$  визначають з інформації про склад та кількість сухого колошникового газу ( $m^3/xв$ )

$$O_{ш} = 0,01[0,5(CO_2 + \Delta H_2) + 0,5(CO + CO_2) - \beta \cdot N_2]V_{сз} \quad (18)$$

де  $\beta$  - об'ємне відношення кисню дугтя до азоту у дугті  $\beta = O_{ш}/N_{ш}$ .

Окисненість шихти  $O_{ш}$  визначають з інформації про хімічний склад та кількість шихтових матеріалів в одній подачі

$$O_{ш} = O_{шн}/Ч, \text{ кг } O_2 / \text{кг чавуну}, \quad (19)$$

де  $O_{шн}$  - кількість газифікованого кисню із шихти однієї подачі,  $кг$ ;

$Ч$  - кількість чавуну, який виплавляється із шихти однієї подачі,  $кг$ .

Значення  $O_{шн}$  та  $Ч$  визначають із наступних співвідношень:

$$O_{шн} = 0,222A_2 \cdot FeO + 0,43(A_2 \cdot Fe - 0,778A_2 \cdot FeO) + 0,43K \cdot Ж \cdot Fe_{жс} + Ч(1,14[Si] + 0,291[Mn] + 1,291[P]) + 0,5(0,85K \cdot S_k \cdot Ч[S]) +$$

$$+ 0,727H \cdot CO_{2кр} - 0,43П \cdot Fe_n \quad (20)$$

$$Ч = (A_2 \cdot Fe + K \cdot Ж \cdot Fe_{жс} + Д \cdot Fe_0 - П \cdot Fe_n) / Fe_{ш}, \quad (21)$$

де  $П$  - винос колошникового пилю,  $кг/подачу$ ;

$Д$  - 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;

$Fe_{ш}, Fe_0, Fe_n, Fe_{жс}$  - вміст заліза, відповідно, у чавуні, металобрухті, колошниковому пилю 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  $Fe_2O_3$ ;

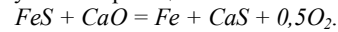
1,14 - відношення маси кисню до маси кремнію у  $SiO_2$ ;

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



З урахуванням коливання втрат тепла з колошниковим газом та охолоджувальною водою створено нові показники для оперативного контролю теплового стану:

$$M_{кр} = M - q_1 - q_2 - q_{кз}; \quad (22)$$

$$M_{1кр} = M_1 - q_1(t-\tau) - q_2 - q_{кз}(t-\tau); \quad (23)$$

$$T_{нкр} = T_n - q_2; \quad (24)$$

де  $\tau$  - час опускання матеріалів зони непрямого відновлення в горні печі,  $години$ .

З метою визначення доцільності контролю втрат тепла дослідили можливі їх значення та вплив на тепловий стан плавки.

Витрату води по основних зонах для типових доменних печей об'ємом  $2000 m^3$  і  $2700 m^3$  прийнято із [4] табл.1.

Витрату тепла розраховали для перепаду температури на  $1^\circ C$ . Продуктивність печі за годину  $P$  визначали через корисний об'єм печі  $V_n$  та коефіцієнт використання цього об'єму ( $KBKO$ , приймаючи його значення 0,7 та 0,8) за формулою

$$P = 1000V_n/24 KBKO, \text{ кг/г} \quad (25)$$

Таблиця 1 Результати розрахунків для доменних печей об'ємом  $2000 m^3$  і  $2700 m^3$

Доменна піч $2000 m^3$				
Зони печі	Витрата води, т/г	Витрата тепла Q при $\Delta t=1^\circ C$ кДж/г	q, кДж/кг KBKO=0,8 P=104166 кг/г	q, кДж/кг KBKO=0,7 P=119047кг/г
I	II	III	IV	V
Нижня лещаць	72	301680	2,896	2,53
Верхня лещаць	74	310060	2,976	2,60
Горн	156	653640	6,27	5,49
Фурмена зона	168	770960	7,40	6,476
Фурмені прилади	594	2488860	23,89	20,906

I	II	III	IV	V
Шлакові прилади	69	289110	2,775	2,428
Запличики	433	1814270	17,47	15,24
Шлаковий стопор	9	37710	0,362	0,317
Шахта	970	4064300	38,83	34,14
Всього на піч	2545	10663550	102,37	89,57(90,2)
Доменна піч 2700 м <sup>3</sup>				
Зони печі	Витрата води, т/г	Витрата тепла Q при Δt=1°C кДж/г	q, кДж/кг КВПО=0,8 P=140625кг/г	q, кДж/кг КВПО=0,7 P=160714кг/г
Горн + лещадь	435	1822650	12,96	11,34
Фурмена зона	210	879900	6,257	5,474
Фурмені прилади	855	3582450	25,475	22,29
Шлакові прилади	85	356150	2,53	2,26
Запличики	545	2283550	16,238	14,208
Шахта	1190	4986100	35,456	31,025
Всього на піч	3320	13910800	98,92	86,556

Витрату тепла доцільно розділити на верхню і нижню частини печі. Верхня частина – це шахта. Витрата тепла в нижній частині печі 2000 м<sup>3</sup> складається з витрати тепла на охолодження горну, фурменої зони, фурмених приладів та запличиків. Отже, для КВПО=0,7 витрата тепла складає:  $q_n = 5,49 + 6,476 + 20,906 + 15,24 = 48,112$  кДж/кг; для КВПО=0,8 витрата тепла складає:  $q_n = 6,27 + 7,40 + 23,89 + 17,417 = 54,977$  кДж/кг.

Витрата тепла в нижній частині печі 2700 м<sup>3</sup> складається з витрати тепла на охолодження горну + лещаді, фурменої зони, фурмених приладів та запличиків і для КВПО=0,7 вона складає:  $q_n = 11,34 + 5,474 + 22,29 + 14,208 = 53,312$  кДж/кг, а для КВПО=0,8  $q_n = 12,96 + 6,257 + 25,475 + 16,238 = 60,93$  кДж/кг.

Автори [4] вважають, що перепад температури води Δt в середньому не перевищує 6 - 8 °C, а для фурм має максимальну величину 12-14 °C. Для попередніх розрахунків приймаємо Δt = 6 °C, при якому витрати тепла мають значення: для нижньої частини печі: ДП 2000 м<sup>3</sup> - КВПО=0,7  $q_n = 48,112 \cdot 6 = 288,67$  кДж/кг, а для КВПО=0,8  $q_n = 54,977 \cdot 6 = 329,862$  кДж/кг; ДП 2700 м<sup>3</sup> - КВПО=0,7  $q_n = 53,312 \cdot 6 = 319,872$  кДж/кг, а для КВПО=0,8  $q_n = 60,93 \cdot 6 = 365,58$  кДж/кг.

Витрата тепла в шахті ( $q_6$ ): ДП 2000 м<sup>3</sup> - КВПО=0,7  $q_6 = 34,14 \cdot 6 = 204,84$  кДж/кг, а для

КВПО=0,8  $q_6 = 38,83 \cdot 6 = 232,98$  кДж/кг; ДП 2700 м<sup>3</sup> - КВПО=0,7  $q_6 = 31,025 \cdot 6 = 186,15$  кДж/кг, а для КВПО=0,8  $q_6 = 35,456 \cdot 6 = 212,736$  кДж/кг.

Для визначення можливих втрат тепла з колошниковим газом вихід сухого колошникового газу розраховували за формулою [2, 3]

$$V_{скз} = \frac{100 V_{кд}}{\alpha \times N_2} \text{ м}^3/\text{хв}; \quad (26)$$

де α - об'ємне відношення дуття до азоту у дутті;

$V_{кд}$  - кількість вдуваного комбінованого дуття, м<sup>3</sup>/хв.

Для комбінованого дуття вологістю 15 г/м<sup>3</sup>, з вмістом 23% кисню і 9% природного газу значення α = 1,46 [2]. Для колошникового газу з концентрацією CO=24%, CO<sub>2</sub>=16%, H<sub>2</sub> = 6% визначаємо N<sub>2</sub> = 100 - CO - CO<sub>2</sub> - H<sub>2</sub> = 100 - 24 - 16 - 6 = 54%. Теплосмість такого газу складає 1,369 кДж/(м<sup>3</sup>·°C)

Для розрахунку приймаємо витрату комбінованого дуття: для ДП 2000 м<sup>3</sup>  $V_{кд} = 3500$  м<sup>3</sup>/хв, а для ДП 2700 м<sup>3</sup>  $V_{кд} = 4300$  м<sup>3</sup>/хв. Вихід сухого колошникового газу, розрахований за формулою (26), складає: для ДП 2000 м<sup>3</sup>  $V_{скз} = 4440$  м<sup>3</sup>/хв; для ДП 2700 м<sup>3</sup>  $V_{скз} = 5454$  м<sup>3</sup>/хв. Продуктивність печей в кг/хв розрахована діленням визначеної за формулою (25) продуктивності печей за годину на 60. Результати розрахунків наведено в табл. 2.

Таблиця 2 Результати визначення втрат тепла з колошниковим газом

Об'єм печі, м <sup>3</sup>	$V_{скз}$ , м <sup>3</sup> /хв	Q при Δt=1 °C кДж/хв	КВПО	q, кДж/кг при Δt=1 °C	q, кДж/кг при Δt=10 °C
2000	4440	6078	0,7	3,1	31
2000	4440	6078	0,8	3,5	35
2700	5454	7466	0,7	2,8	28
2700	5454	7488	0,8	3,2	32

На рис.1 спостерігається майже функціональна залежність між вмістом сірки в чавуні та показником  $T_n^{7a}$ . Тіснота цієї залежності на протязі цього періоду підтверджується високим значенням ковшного коефіцієнта кореляції - модуль його значення знаходився у границях від 0,89 до 0,99. Із рисунку видно, що середньо

годинне значення показника  $T_n^{7a}$  змінювалося на ± 40-200 кДж/кг, що викликало зміну складу чавуну. Зміна перепаду температури води на 1- 3 °C та температури колошникового газу на 10-20 °C викличе зміну витрати тепла на 250 кДж/кг . і більше, що вплине на тепловий стан плавки та якість чавуну. Отже, необхідно контро-

лювати втрати тепла з колошниковим газом та з охолоджуючою водою, що значно підвищить достовірність прогнозування і стабілізації якості чавуну.

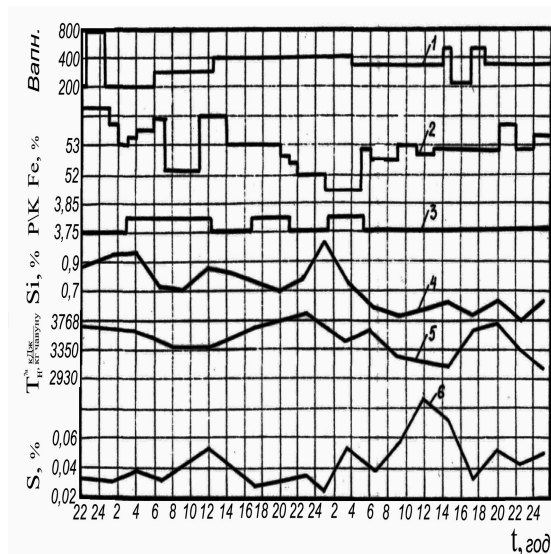


Рис. 1 Графіки зміни в часі параметрів процесу

- 1 – маса вапняку в подачі;
- 2 – вміст заліза в рудній частині шихти;
- 3 – рудне навантаження на кокс;
- 4 – вміст кремнію в чавуні;
- 5 – прихід тепла в нижню частину печі  $T_n^{7a}$ ;
- 6 – вміст сірки в чавуні.

## Висновки

Зміна перепаду температури води на 1-3 °C та температури колошникового газу на 10-20 °C викличе зміну витрати тепла на 250 кДж/кг і більше, що значно вплине на тепловий стан плавки та якість чавуну. Це підтверджує необхідність безперервного контролю втрат тепла. Створені нові показники для оперативного контролю теплового стану дозволять значно підвищити достовірність прогнозування і стабілізації якості чавуну.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Довгалюк Б. П. Умови ефективного використання АСУ ТП доменної печі. Збірник наукових праць 18 Міжнародної наукової конференції з автоматичного управління, „Автоматика — 2011”, Т.1. — Львів : 2011. — С.34—36.
2. Довгалюк Б. П. Основные номограммы доменного процесса / Довгалюк Б. П. К. : Техніка, 1985. — 56 с.
3. Довгалюк Б. П. Автоматизована система керування технологічними процесами доменної плавки / Довгалюк Б. П. — Дніпродзержинськ, ДДТУ. 2009. — 245 с.
4. Справочник. Доменное производство / М. : Metallurgizdat. 1963. — 266 с.

пост.20.02.13

## Возникновение неустойчивостей при закипании эмульсионных сред

Р. А. КЛИМОВ

Днепродзержинский государственный технический университет

В статье предлагается рассмотрение процессов дробления дисперсной фазы эмульсии. Показана возможность дробления больших капель малыми при вскипании водной фазы в результате резкого сброса давления, с учетом силового воздействия одной капли на другую, основанного на критериях неустойчивости Бонда и Вебера.

В статье запропоновано розгляд процесів подрібнення дисперсної фази емульсій. Показана можливість подрібнення великих крапель дрібними при закипанні водної фази в результаті різкого скидання тиску, з урахуванням силової взаємодії однієї краплі на іншу, яке засноване на критеріях неустойчивости Бонда та Вебера.

In the given work the consideration of processes crushing of dispersion phase of emulsion is offered. Possibility of crushing of large drops is shown small at boiling of water phase up as a result of sharp up cast of pressure, taking into account the power influence of one drop on other, based on the criteria of instability of Bond and Weber.

**Введение.** Процессы деформации и дробления дисперсной фазы рассматривают многие исследователи [1-3], но данные явления требуют дополнительного изучения, которое позволит определить наиболее выгодные в экономическом и экологическом плане параметры для их реализации.

Классическая теория деформации и разрушения капель в зависимости от степени турбулентности потока принадлежит Колмогорову. Он рассматривал данный процесс как результат проявления большого числа случайных явлений и на основании теории вероятности получил логарифмическое распределение капель по