

УДК 662:551

**Богушевський В.С., д.т.н., Зубова К.М.**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОНВЕРТЕРНОГО ПРОЦЕСУ ЗА ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОЮ ТЕХНОЛОГІЄЮ**

*Розглянута енергозберігаюча технологія (ЕЗТ) конвертерного процесу. Встановлено, що при визначеному хімічному складі чавуна тепловий режим процесу залежить від швидкості зневуглицювання, ступеня допалювання СО до СО<sub>2</sub> та кількості оксидів заліза у шлаку, що, в свою чергу, залежать від відстані фурми до рівня спокійної ванни. Доведено, що процес зневуглицювання є нестационарним, описується інерційною ланкою першого порядку, коефіцієнт передачі й постійна часу якої залежить від періоду плавки й тривалості продувки. Зміна ступеня допалювання СО до СО<sub>2</sub> також описується інерційною ланкою. Наведені чисельні значення коефіцієнтів рівнянь, що описують конвертений процес з ЕЗТ. Математична модель процесу як об'єкта регулювання описана нестационарною коливальною ланкою.*

*Наведена математична модель регулювання киснево-конвертерного процесу може бути реалізована на базі ПД-регулятора або регулятора з нечіткою логікою.*

Модель, киснево-конвертерний процес, регулятор, передаточна функція.

**Вступ**

У сучасних умовах розвитку металургійного виробництва достатньо актуальними являються задачі по розробці ресурсозберігаючих технологічних режимів виплавки сталі, теоретичних і практичних аспектів нових енергозберігаючих способів продувки сталеплавильної ванни технологічним газом та підвищення ефективності теплової роботи печей.

Одним із шляхів зниження витратних показників є утилізація фізичної та хімічної енергії газів, які відходять із конвертера. Використання частини конвертерного газу, який утворився, у якості палива в порожнині конвертера для нагріву металевого брухту дозволить збільшити частку брухту у шихті [1].

Найбільш розповсюдженим способом збільшення ступеня допалювання СО у порожнині конвертера є регулювання відстані фурми над рівнем спокійної ванни [2]. Незважаючи на багато досліджень в цьому напрямку на даний момент відсутня аналітична модель регулювання процесу за енергозберігаючою технологією (ЕЗТ) [3 – 5], що звужує можливість застосування сучасних методів регулювання.

Наведені в статті дослідження проводились в Національному технічному університеті України «КПІ» по темі «Модель і система керування конвертерною плавкою по енергозберігаючій технології», Державний реєстраційний номер 0112U003476.

**Постановка задачі**

Метою досліджень є створення моделі регулювання конвертерного процесу в режимі ЕЗТ шляхом знаходження оптимального значення ступеня допалювання СО в порожнині конвертера і підтримання цього режиму в процесі продувки.

**Результати досліджень**

Із балансового рівняння витрати дуття на продувку [6] маємо

$$v_C = \frac{v\gamma_1(1-\gamma_2) - v_{O_2Si} - v_{O_2Mn} - v_{O_2Fe} - v_{O_2P}}{\left(\frac{22,4}{24} + \gamma_{CO_2} \frac{22,4}{24}\right)10^3}, \quad (1)$$

де  $v_C$  – швидкість зневуглицювання, т/хв.;  $v$  – інтенсивність подачі дуття, м<sup>3</sup>/хв.;  $\gamma_1$  – вміст кисню у дутті;  $\gamma_2$  – умовно-постійна величина, яка характеризує втрати кисню;  $v_{O_2Si}$ ,  $v_{O_2Mn}$ ,  $v_{O_2Fe}$ ,  $v_{O_2P}$  – відповідно інтенсивність витрати кисню на окиснення силіцію,

мангану, заліза і фосфору, м<sup>3</sup>/хв.;  $\gamma_{\text{CO}_2}$  – ступінь окиснення вуглецю до  $\text{CO}_2$  у порожнині конвертера.

Як відомо [7] величини  $\gamma_{\text{CO}_2}$  і  $\text{FeO}$  є функціями відстані фурми до рівня спокійної ванни

$$\gamma_{\text{CO}_2} = [10,2(H - 1,5)^2 + 3,1] \cdot 10^{-2}; \quad (2)$$

$$\text{FeO} = 16,34H - 5,63, \quad (3)$$

де  $H$  – відстань фурми до рівня спокійної ванни, м;  $\text{FeO}$  – вміст окису заліза в шлаку, перерахованому на його закис, %.

Із (3) знайдемо величину  $v_{\text{O}_2\text{Fe}}$

$$v_{\text{O}_2\text{Fe}} = m_{\text{ч}} \gamma_{\text{ш}} \frac{16}{72} \cdot \frac{22,4}{32} \text{FeO} \tau_{\text{п}}^{-1} \cdot 10, \quad (4)$$

де  $m_{\text{ч}}$  – маса чавуну,  $\gamma_{\text{ш}}$  – частка шлаку від маси металу;  $\tau_{\text{п}}$  – середня тривалість продувки, хв.

Підставляючи (3) в (4) і приймаючи, що для 160-т конвертера  $m_{\text{шл}} = 0,1$ , а  $\tau_{\text{п}} = 20$  хв., отримуємо

$$v_{\text{O}_2\text{Fe}} = 160 \cdot 0,1 \cdot \frac{16}{72} \cdot \frac{22,4}{32} \text{FeO} \frac{1}{20} \cdot 10 = 1,25 \text{FeO}. \quad (5)$$

Підставляючи (3) в (5) знаходимо зв'язок між інтенсивністю витрати кисню на окиснення заліза і відстанню фурми до рівня спокійної ванни

$$v_{\text{O}_2\text{Fe}} = 20,42H - 7,04. \quad (6)$$

Підставляючи (2) і (6) в (1) отримуємо

$$v_{\text{C}} = \frac{v\gamma_1(1 - \gamma_2) - v_{\text{O}_2\text{Si}} - v_{\text{O}_2\text{Mn}} - 20,42H - v_{\text{O}_2\text{P}} - 7,04}{\frac{22,4}{24} \{1 + [10,2(H - 1,5)^2 + 3,1] \cdot 10^{-2}\} \cdot 10^3}. \quad (7)$$

В загальному вигляді залежність можна представити як

$$v_{\text{C}} = \frac{\alpha_0 - 20,42H}{0,93[1,031 + 0,102(H - 1,5)^2] \cdot 10^3}. \quad (8)$$

Коефіцієнт  $\alpha_0$  змінюється протягом продувки: для першої частини продувки, коли вигоряють домішки чавуну, він збільшується відповідно зменшення швидкості вигорання домішок, для другої, коли швидкості окиснення силіцію, мангану і фосфору й відповідно витрати кисню на ці реакції наближені до нуля, визначається тільки інтенсивністю і хімічним складом дуття, в кінцевому періоді продувки знову зменшується, відповідно із зростанням у цей період кількості кисню, що йде на реакції окиснення заліза і допалення  $\text{CO}$  до  $\text{CO}_2$ . Тривалість першого періоду становить 0,25 тривалості продувки, третій починається з 0,8 тривалості продувки. При інтенсивності подачі дуття 400 м<sup>3</sup>/хв., і  $\gamma_1 = 0,995$ , а  $\gamma_2 = 0,99$ , масі чавуну 125 т, вмісту в чавуні силіцію 0,8 %, мангану 0,6 %, фосфору 0,08 %, зміну коефіцієнта  $\alpha_0$  в першому періоді, що для 160 тонного конвертера закінчується на 5 хвилині, можна представити рівнянням

$$\alpha_0(\tau) = 173,23 + 72,933\tau - 7,9434\tau^2 + 0,3797\tau^3, \quad (9)$$

де  $\tau$  – тривалість продувки, хв.

Графічно залежність має вигляд (рис. 1).

У другому періоді отримуємо (рис. 2)

$$v_{\text{C}} = \frac{386,98 - 20,42H}{[0,96 + 0,095(H - 1,5)^2] \cdot 10^3}. \quad (10)$$

Коефіцієнт  $\alpha_0$  при цьому постійний і дорівнює 386,98.

У третьому періоді коефіцієнт  $\alpha_0$  знаходимо з рівняння

$$\alpha_0(\tau) = 386,98 - 109,038(\tau - 16) + 11,8748(\tau - 16)^2 - 0,5677(\tau - 16)^3. \quad (11)$$

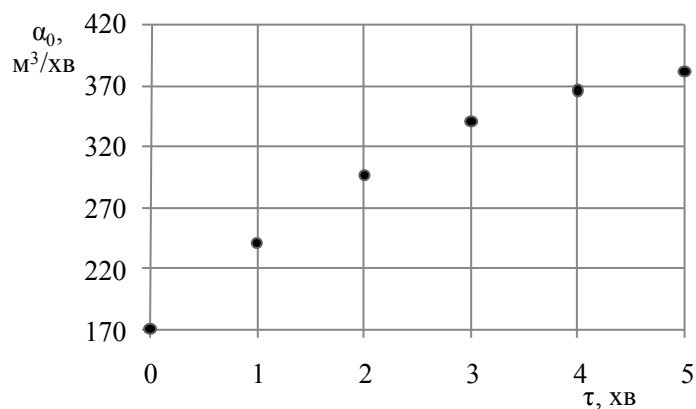
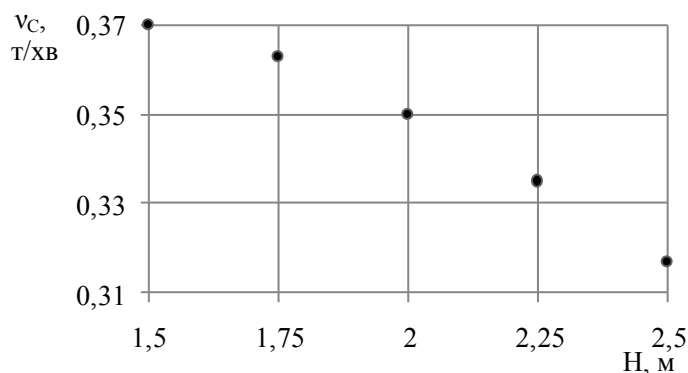
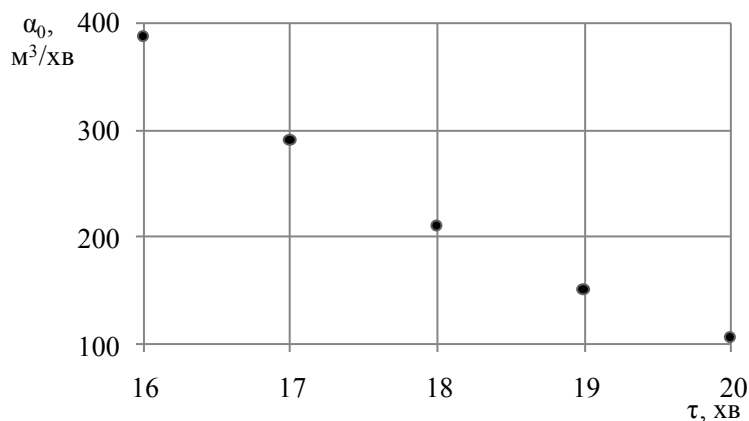

 Рис. 1. Залежність коефіцієнта  $\alpha_0$  від тривалості продувки у першому періоді


Рис. 2. Залежність швидкості знеуглецювання від відстані фурми до рівня спокійної ванни

Графічно залежність має вигляд (рис. 3).

Перехідний процес зміни  $v_c$  від зміни  $H$  описується інерційною ланкою першого порядку виду

$$W(s) = \frac{k_{v_c}}{T_{v_c}s + 1}, \quad (12)$$


 Рис. 3. Залежність коефіцієнта  $\alpha_0$  від тривалості продувки у третьому періоді

де  $k_{v_c}, T_{v_c}$  – відповідно коефіцієнт передачі по каналу відстань фурми до рівня спокійної ванни – швидкість знеуглецювання, т/(хв · м), і постійна часу, с.

Якщо значення  $k_{v_c}$  легко знайти з (9), (10) і (11), то при знаходженні  $T_{v_c}$  виникають труднощі, що пов'язані з перехідними процесами у вимірювачі швидкості знеуглецювання. Тому для визначення постійної часу використовували вимірювання тиску газів у перехідному

газоході конвертера [8]. Величина постійної часу виявилися нестационарною і також залежала від періоду плавки. Вона може бути описана функціями:

– для першого періоду

$$T_{vC}(\tau) = 1,143 + 4,4469\tau - 0,4843\tau^2, \quad (13)$$

– для другого –

$$T_{vC} = 11,267, \quad (14)$$

– для третього –

$$T_{vC}(\tau) = 11,267 - 4,4469(\tau - 16) + 0,4843(\tau - 16)^2. \quad (15)$$

Графічно залежність має вигляд (рис. 4).

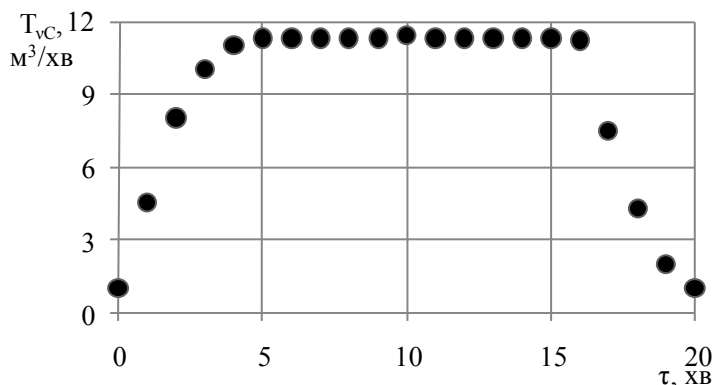


Рис. 4. Залежність постійної часу  $T_{vC}$  від тривалості продувки

Зміна швидкості зневуглецювання приводить до зміни ступеня окиснення вуглецю до  $\text{CO}_2$  у порожнині конвертера. Цей процес також описується інерційною ланкою першого порядку виду

$$W(s) = \frac{k_{\gamma\text{CO}_2}}{T_{\gamma\text{CO}_2} s + 1}, \quad (16)$$

де  $k_{\gamma\text{CO}_2}, T_{\gamma\text{CO}_2}$  – відповідно коефіцієнт передачі по каналу швидкість зневуглецювання – ступінь окиснення вуглецю до  $\text{CO}_2$ , хв./т вуглецю і стала часу, с. Тут із (1)  $k_{\gamma\text{CO}_2} = 3,33$  хв./т, а за результатами експериментальних досліджень [8]  $T_{\gamma\text{CO}_2} = 2,146$  с.

Обидві ланки з'єднані послідовно й передаточна функція системи буде мати вигляд класичної передаточної функції коливальної ланки, в якій вхідна величина відстань фурми до рівня спокійної ванни, а вихідна – ступінь окиснення вуглецю до  $\text{CO}_2$

$$W(s) = \frac{k_H^{\gamma\text{CO}_2}}{T_2^2 s^2 + 2\varepsilon T_1 s + 1}, \quad (17)$$

де  $k_H^{\gamma\text{CO}_2} = k_{vC} \cdot k_{\gamma\text{CO}_2}$  – коефіцієнт передачі по каналу відстань фурми до рівня спокійної ванни – ступінь окиснення вуглецю до  $\text{CO}_2$ ,  $T_1 = (T_{vC} + T_{\gamma\text{CO}_2})/2\varepsilon$  і  $T_2^2 = T_{vC} \cdot T_{\gamma\text{CO}_2}$  – постійні часу;  $\varepsilon$  – коефіцієнт демпфування, що дорівнює 0,9918.

Коефіцієнт передачі й постійні часу є нестационарними величинами залежними від періоду продувки і в кінцевому рахунку від її тривалості:

– для першого періоду

$$k_H^{\gamma\text{CO}_2}(\tau) = 474,86 + 242,8669\tau - 26,4515\tau^2 + 1,2644\tau^3;$$

$$T_1(\tau) = 1,568 + 2,2418\tau - 0,2442\tau^2;$$

$$T_2^2(\tau) = 2,4529 + 9,543\tau - 1,0393\tau^2,$$

– для другого –

$$k_H^{y_{CO_2}} = 1186,6455;$$

$$T_1(\tau) = 6,7619;$$

$$T_2^2(\tau) = 24,1790,$$

– для третього –

$$k_H^{y_{CO_2}}(\tau) = 1186,6455 - 363,0965(\tau - 16) + 39,5431(\tau - 16)^2 + 1,8904\tau^3;$$

$$T_1(\tau) = 6,7619 - 2,2418(\tau - 16) + 0,2442(\tau - 16)^2;$$

$$T_2^2(\tau) = 24,1790 - 9,543(\tau - 16) + 1,0393(\tau - 16)^2,$$

Для спрощення розрахунків механізм переміщення фурми опишемо передаточною функцією інтегруючої ланки

$$W_M(s) = \frac{k_M}{s}, \quad (19)$$

де  $k_M$  – коефіцієнт передачі,  $c^{-1}$ .

В цьому випадку вхід системи  $u(\tau) = \alpha_1(\tau)$  – задана ступінь окиснення вуглецю до  $CO_2$ , а вихід  $x(\tau) = \alpha_2(\tau)$  – відпрацьований системою ступінь окиснення вуглецю до  $CO_2$ ,  $m(\tau)$  – керуючий сигнал на виході регулятора, а об'єкт керування описується загальною передаточною функцією

$$W(s) = \frac{\alpha_2(s)}{m(s)} = \frac{\alpha}{s(s^2 + bs + a)}, \quad (20)$$

де  $b = 2\varepsilon \cdot T_1 / T_2^2$ ;  $a = 1 / T_2^2$ ;  $\alpha = k_H^{y_{CO_2}} \cdot k_M \cdot a = k_H^{y_{CO_2}} \cdot k_M / T_2^2$ .

Коефіцієнти  $a$ ,  $b$  і  $\alpha$  також залежать від часу продувки і при  $k_M = 1$  дорівнюють:

1. Коефіцієнт  $a$  (рис. 5):

– для першого періоду

$$a(\tau) = 0,41 - 0,01\tau + 0,00011\tau^2 - 0,000005\tau^3 + 0,0000000008\tau^4;$$

– для другого –

$$a(\tau) = 0,0413;$$

– для третього –

$$a(\tau) = -21,68 + 0,066\tau - 0,000067\tau^2 + 0,00000002\tau^3$$

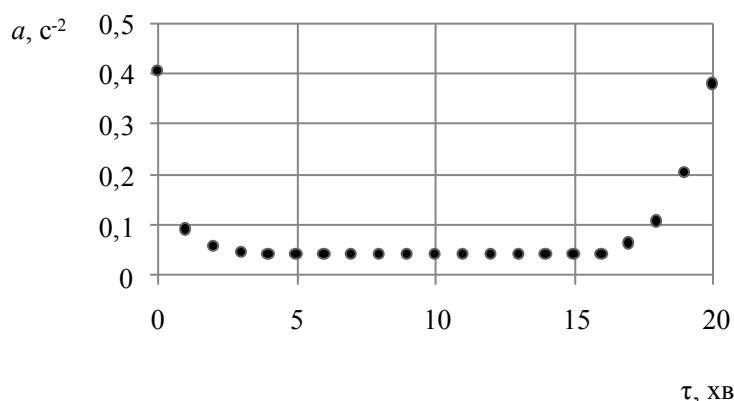


Рис. 5. Залежність коефіцієнту  $a$  передаточної функції від тривалості продувки

2. Коефіцієнт  $b$  (рис. 6):

– для першого періоду –

$$b(\tau) = 1,27 - 0,021\tau + 0,00026\tau^2 - 0,0000016\tau^3 + 0,0000000005\tau^4 - 0,000000000005\tau^5;$$

– для другого –

$$b(\tau) = 0,5547;$$

– для третього –

$$b(\tau) = -46,99 + 0,14\tau - 0,00015\tau^2 + 0,00000005\tau^3,$$

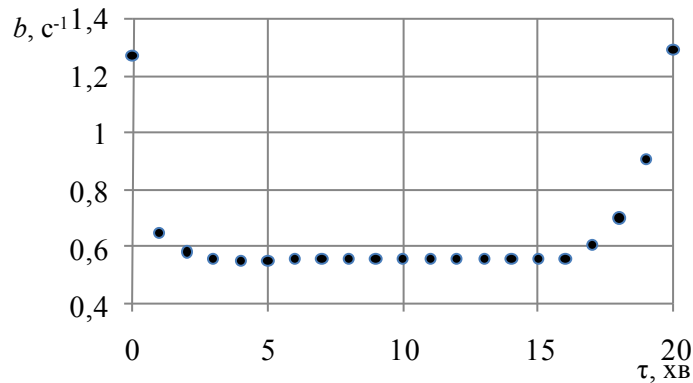


Рис. 6. Залежність коефіцієнту  $b$  передаточної функції від тривалості продувки

3. Коефіцієнт  $\alpha$  (рис. 7):

- для першого періоду:

$$\alpha(\tau) = 193,6883 - 4,37\tau + 0,053\tau^2 - 0,00031\tau^3 + 0,0000009\tau^4 - 0,000000001\tau^5;$$

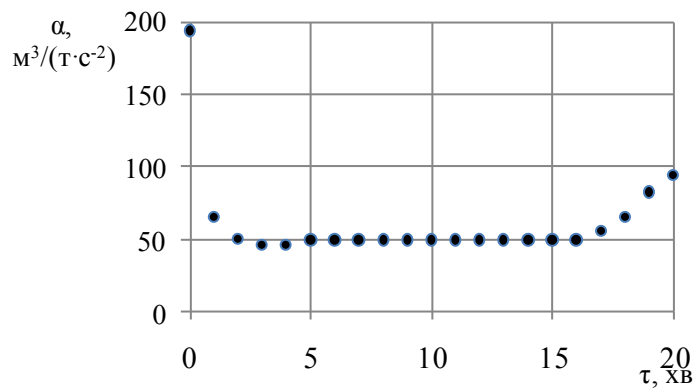


Рис. 7. Залежність коефіцієнту  $\alpha$  передаточної функції від тривалості продувки

– для другого –

$$\alpha(\tau) = 49,0775;$$

– для третього –

$$\alpha(\tau) = 4844,52 - 13,36\tau + 0,012\tau^2 - 0,000004\tau^3,$$

Математична модель процесу як об'єкта регулювання описується нестационарною коливальною ланкою, диференційне рівняння якої має вигляд

$$\frac{d^2\alpha_2(\tau)}{d\tau^2} + b(\tau)\frac{d\alpha_2}{d\tau} + a(\tau)\alpha_2(\tau) = \alpha_1(\tau)m(\tau). \quad (21)$$

Реалізація моделі може бути виконана на базі ПІД-регулятора або регулятора з нечіткою логікою [9].

### Висновки

Отримані чисельні значення коефіцієнтів передаточної функції регулювання конвертерного процесу в режимі ЕЗТ, що показали нестационарність процесу, яка залежить від часу і періоду продувки. Математична модель процесу як об'єкта регулювання описується нестационарною коливальною ланкою.

Подальші дослідження будуть проводитись в напрямку математичного і фізичного моделювання процесу регулювання з застосуванням різних законів регулювання.

1. Бойченко Б.М., Охотський В.Б., Харлашин П.С.: Підручник / Конвертерне виробництво сталі (теорія, технологія, якість сталі, конструкція агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія). – Дніпропетровськ: РВА „Дніпро-ВАЛ”, 2004. – 454 с.
2. Основи металургійного виробництва металів і сплавів: Підручник / Д.Ф.Чернега, В.С.Богушевський, Ю.Я.Готвянський та ін.; За ред. Д.Ф.Чернеги, Ю.Я.Готвянського. – К.: Вища школа, 2006. – 503 с.
3. Чернятевич А.Г. Новые разработки конструкций кислородных фурм и способов продувки ванны 160-т конвертеров ОАО „АрселорМиттал Кривой Рог” / А.Г.Чернятевич, Е.Н.Сигарев, И.В.Чернятевич//Теория и практика металлургии. – 2010. – № 1 – 2. – С. 31 – 38.
4. Богушевський В.С., Зубова К.М., Сухенко В.Ю. Керування конвертерною плавкою в умовах енергозберігаючої технології // Наукові вісті НТУУ „КПІ”. – 2011. – № 5. – С. 65 – 69.
5. Богушевський В.С., Сухенко В.Ю., Сергеева Е.А. Математическая модель управления дутьевым режимом конвертерной плавки // Известия вузов. Черная металлургия. – 2011. – № 8. – С. 24 – 25.
6. Богушевський В.С., Сергеева В.А., Жук С.В. Динамическая модель управления температурным режимом конвертерной ванны // Металл и литье Украины. – 2011. – № 5. – С. 24 – 28.
7. Богушевський, В. С. Математические модели и системы управления конвертерной плавкой / В. С. Богушевський, Л. Ф. Литвинов, Н. А. Рюмшин, В. В. Сорокин. – К.: НПК “Киевский институт автоматики”, 1998. – 304 с.
8. Богушевський В.С., Рюмшин Н.А., Сорокин Н.А. АСУ ТП производства стали в конвертерах. – К.: Техніка, 1991. – 180 с.
9. Гостев В.И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. – К.: „Радіоаматор”, 2008. – 972 с.