

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ТА СИСТЕМ

УДК 669.162.22

© Кравченко В.П.*

АНАЛІЗ СПОСОБІВ РЕГУЛЮВАННЯ ПОДАЧІ ДУТТЯ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ГАЗОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ У ДОМЕННІЙ ПЕЧІ

Виконано аналітичне дослідження двох способів регулювання подачі дуття - з постійним тиском і з постійними витратами та їх вплив на газодинамічні процеси у доменній печі і, зокрема, на її колошнику. Одержано диференційне рівняння зміни тиску газу на колошнику, за допомогою якого знайдені умови ведення газодинамічного режиму печі при розглянутих способах подачі дуття.

Ключові слова: доменна піч, способи подачі дуття, газодинамічний процес, диференційне рівняння, тиск колошникового газу.

Кравченко В.П. Анализ способов регулирования подачи дутья и их влияние на газодинамические процессы в доменной печи. Выполнено аналитическое исследование двух способов регулирования подачи дутья – с постоянным давлением и постоянным расходом, а также их влияние на газодинамические процессы в доменной печи и, в частности, на ее колошнике. Получено дифференциальное уравнение изменения давления газа на колошнике, с помощью которого найдены условия ведения газодинамического режима печи при рассмотренных способах подачи дутья.

Ключевые слова: доменная печь, способ подачи дутья, газодинамический процесс, дифференциальное уравнение, давление колошникового газа.

V.P. Kravchenko. Analysis of ways to control the supply of the blast, and their impact on gas-dynamic processes in the blast furnace. The article presents the analysis of two methods of control over hot blast supply into a blast furnace with constant pressure and constant amount (consumption). The analysis of these two methods was performed with the aim of determining their influence upon changes in gas pressure in the blast furnace top. The blast furnace was considered as a unity of vessels (furnace hearth, the top) and gas-dynamic resistance (a column of charge materials). A differential equation was obtained, with regard to the dynamic balance of gas flow at the inlet and outlet of the top; the equation relates the pressure and gas consumption at the top to the pressure and hot blast consumption at the inlet and outlet of the furnace and to the resistance of the column of charge materials. The column of charge materials is considered as n-th number of channels through which gas flow inside the furnace moves and which resist to the flow. By the analysis of this equation at steady state (automatic stabilization of gas pressure in the top), the conditions were obtained to be satisfied with the specified value of gas pressure in the top. This value is equal to a half of the sum of the value of hot blast pressure at the inlet into the furnace and the value of pressure inside the collector of blast furnace gas. This conclusion is verified by the operation practice of blast furnaces in Ukraine. While analyzing the second method of controlling the supply of blast supply-stabilization of consumption (amount) of hot blast supplied into the furnace it has been shown that the method could be realized in condition of stabilization of the amount of blast furnace gas, going out of the furnace. As the resistance of the column of charge materials constantly changes it is necessary to change the hot blast pressure in order to ensure the constant amount of blast, supplied into the furnace. It is often connected with possible substantial pressure fluctuations of hot blast at the inlet of the furnace, which may result in stop-

* канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь
kravchenko_vp@ukr.net

pages in the motion of the column of charge materials. Due to it the hot blast pressure stabilization at the inlet of the furnace and the pressure stabilization in the top seem to be the most rational way to control the blast supply.

Keywords: hot blast, charge materials, gas flow, gas pressure, stabilization, blast furnace, top, blast furnace gas.

Постановка проблеми. Існують два основних способи регулювання подачі дуття у доменну піч. Перший – це подача дуття з постійним заданим тиском гарячого дуття P_{20} і другий – подача дуття із постійними заданими витратами F_{20} . Від обраного способу подачі дуття залежать як режими роботи турбокомпресора (повітродувної машини), так і газодинамічний режим доменної печі. Тому аналіз способів подачі дуття і визначення їх впливу на газодинамічні процеси у доменній печі мають певний теоретичний і практичний інтерес.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженню газодинамічного режиму доменної печі присвячена велика кількість робіт. Питанню газодинаміки печі при підвищеному тиску в ній присвячені фундаментальні роботи проф. В.М. Щедрина [1]. Детально розглядаються питання газодинаміки печі в роботі проф. В.П.Тарасова [2]. Крім того цим питанням присвячені численні публікації в періодичних виданнях. Але мало вивченими залишаються важливі для практики питання аналізу способів подачі дуття в доменну піч і вплив їх на газодинамічний режим доменної плавки. Представлена робота є намаганням, в деякій мірі, висвітлити ці питання.

Мета статті. Для кожного з двох способів подачі дуття у доменну піч аналітично знайти залежність зміни тиску газу на колошнику від параметрів дуття (тиску, або витрат) і параметрів стовпа шихти (газодинамічного опору). Шляхом аналізу одержаної залежності визначити можливий газодинамічний режим роботи доменної печі.

Викладення основного матеріалу. З точки зору газодинамічних процесів доменну піч (ДП) можливо представити, як сукупність горну, частина якого є ємкість, заповнена горновими газами, стовпа шихтових матеріалів і колошнику, який є ємкістю, заповненою колошниковим газом. Із колошника газ проходить очищення у газоочищувальному устаткуванні і далі попадає у колектор доменного газу.

Розглянемо спочатку спосіб подачі дуття з постійним тиском $P_{20зд}$. У цьому випадку турбокомпресор, який виробляє дуття, працює на своїх робочих характеристиках [3], коливаючись поблизу своєї робочої точки (рис. 1), у зв'язку з коливанням витрат гарячого дуття, яке сприймає ДП в кожний даний момент.

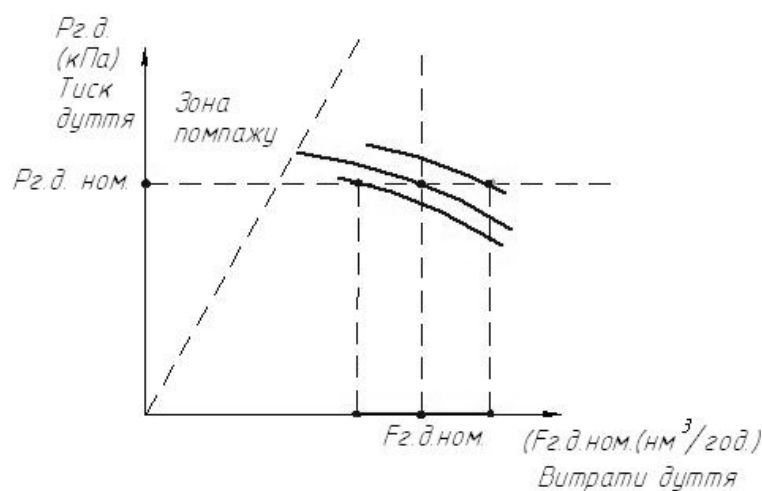


Рис. 1 – Робоча газодинамічна характеристика турбокомпресора при стабілізації тиску дуття

При цьому способі подачі дуття тиск гарячого дуття P_{20} в першому наближенні можна вважати таким, що дорівнює тиску горнових газів P_1 . Тим більше, що в останні часи відсутне

вдування в горн природного газу, тому кількість горнових газів збільшується незначно. Під дією цього тиску горнові гази проходять через стовп шихти, взаємодіючи з шихтовими матеріалами, в результаті утворюється колошниковий газ, який на колошнику ДП має тиск P_k . Після очищення цей газ подається у колектор доменного газу, де підтримується певний тиск P_2 .

Стовп шихтових матеріалів має велику кількість порожнин, які утворюють певні канали при проходженні через них газів. При опусканні стовпа шихтових матеріалів кількість цих каналів n та їх газодинамічний опір R_i безперервно змінюються, тобто ці величини є випадковими. Таким чином, якщо газодинамічний режим доменної печі ведеться шляхом підтримання постійного тиску гарячого дуття, тобто $P_1 = const$, то через стовп шихти буде проходити різна кількість горнових газів в силу коливань n та R_i .

Структурно це можливо представити так (рис. 2).

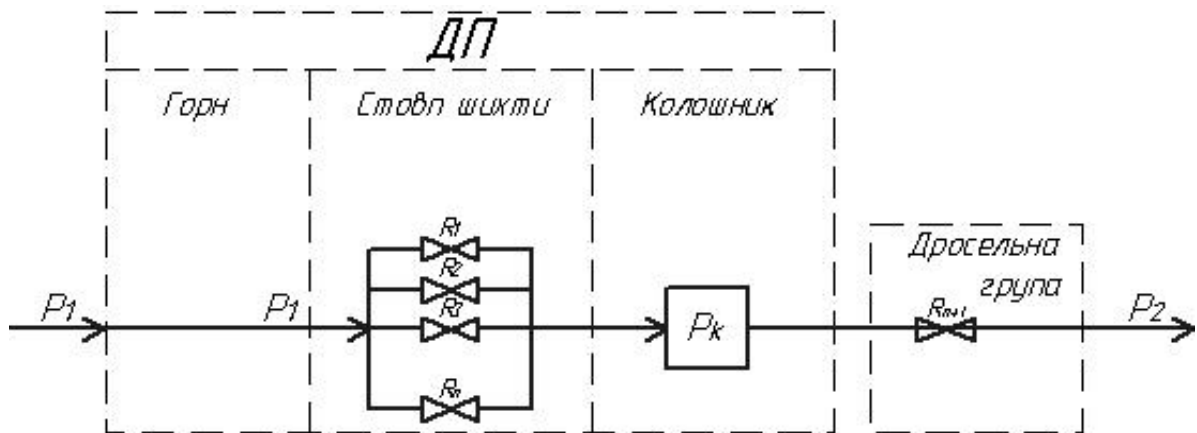


Рис. 2 – Газодинамічна структура доменної печі

Перша ємкість (горн) має тиск P_1 і з'єднана з другою ємкістю (колошником) n каналами, кожний з яких має свій опір R_1, R_2, \dots, R_n . Тиск газу на колошнику (при відсутності автоматичного регулювання) буде змінюватись під дією потоку газів, які поступають, проходячи через стовп шихти, і потоку колошникового газу, який виходить і іде на очищення. Позначимо ємкість колошнику через C_k , а газодинамічний опір газоочищувального устаткування через R_{n+1} . Тоді швидкість зміни тиску газу на колошнику $\frac{dP_k}{d\tau}$ буде визначатись балансом потоку, який приходить на колошник і який уходить з нього [4].

$$C_k \frac{dP_k}{d\tau} = \left[\frac{(P_1 - P_k)}{R_1} + \frac{(P_1 - P_k)}{R_2} + \frac{(P_1 - P_k)}{R_3} + \dots + \frac{(P_1 - P_k)}{R_n} \right] - \frac{(P_k - P_2)}{R_{n+1}} \quad (1)$$

або скорочено:

$$C_k \frac{dP_k}{d\tau} = (P_1 - P_k) \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} - (P_k - P_2) \frac{1}{R_{n+1}}. \quad (2)$$

Проаналізуємо одержане рівняння відносно розмірності фізичних величин, які входять до нього:

$$C_k [M^3] \frac{dP_k}{d\tau} \left[\frac{Pa}{c} \right] = (P_1 - P_k) [Pa] \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} [?] - (P_k - P_2) [Pa] \frac{1}{R_{n+1}} [?]. \quad (3)$$

Із рівняння (3) виходить, що розмірність величини $\frac{1}{R_i}$ буде $[m^3/c]$, тобто це розмірність витрат газу F_i , який проходить через даний опір R_i . Тобто опір R_i є величиною зворотною

витратам газу, який проходить через нього. Хоча при проходженні горнових газів через стовп шихти вони перетворюються на колошниковий газ і збільшуються по кількості, але рушійною силою їх все рівно залишається різниця тисків $(P_1 - P_k)$. Тому вплив тиску P_1 на потік газу, який проходить через стовп шихти, буде мінятися за рахунок внутрішнього джерела газу у стовпі шихти, але вплив цього фактора не змінює суті даної задачі. Через кожний окремих випадковий i -й канал з опором R_i проходить на колошник випадкова F_i кількість газів, але сума їх дає загальну кількість газу $F_{\kappa 21}(n)$.

Як відомо [5], при будь-якому законі розподілення випадкових величин (в даному разі F_i) сума цих величин буде мати нормальний закон розподілення. Тому сумарна кількість газу $F_{\kappa 21}(n)$ має нормальний закон розподілення з математичним очікуванням $M[F_{\kappa 21}(n)] = F_{\kappa 21}$ та дисперсією $D[F_{\kappa 21}(n)]$.

Оперуючи тільки середніми сумарними величинами $F_{\kappa 21}$ та $F_{\kappa 22}$, рівняння (2) можливо записати так:

$$C_k \frac{dP_k}{d\tau} = (P_1 - P_k)F_{\kappa 21} - (P_k - P_2)F_{\kappa 22}, \quad (4)$$

тут $F_{\kappa 21}$ – середні сумарні витрати газу, який приходить на колошник;

$F_{\kappa 22}$ – середні сумарні витрати газу, який уходить із колошника.

У виразі (4) перенесемо величину P_k у ліву частину. Після цього отримуємо:

$$\frac{C_k}{(F_{\kappa 21} + F_{\kappa 22})} \frac{dP_k}{d\tau} + P_k = P_1 \frac{F_{\kappa 21}}{(F_{\kappa 21} + F_{\kappa 22})} + P_2 \frac{F_{\kappa 22}}{(F_{\kappa 21} + F_{\kappa 22})}.$$

Позначаючи через $T = \frac{C_k}{(F_{\kappa 21} + F_{\kappa 22})}$, остаточно одержимо:

$$T \frac{dP_k}{d\tau} + P_k = P_1 \frac{F_{\kappa 21}}{(F_{\kappa 21} + F_{\kappa 22})} + P_2 \frac{F_{\kappa 22}}{(F_{\kappa 21} + F_{\kappa 22})}. \quad (5)$$

Одержане диференціальне рівняння описує зміну тиску газу на колошнику P_k в залежності від тиску P_1 та витрат $F_{\kappa 21}$ колошникового газу, який приходить на колошник, а також від тиску P_2 у колекторі чистого доменного газу та витрат $F_{\kappa 22}$ газу, який покидає колошник. Оскільки витрати $F_{\kappa 21}$ та $F_{\kappa 22}$ є величинами випадковим, то ми маємо диференціальне рівняння (4) з випадковими коефіцієнтами. При цьому зрозуміло, що кількість газу, яка проходить через стовп шихти, постійно змінюється в силу зміни газопроникливості шихти при її опусканні вниз, тому для стабілізації тиску газу на колошнику необхідно відповідним чином змінювати опір газоочищувальної установки (дросельної групи), тобто змінювати кількість газу $F_{\kappa 22}$, яка покидає колошник.

Розглянемо усталений режим автоматичної стабілізації тиску газу на колошнику на заданому рівні, тобто $P_k = P_{k \text{ зад}}$. В цьому режимі $T(dP_k/d\tau = 0)$ і тоді із (5) маємо:

$$P_k = P_1 \frac{F_{\kappa 21}}{(F_{\kappa 21} + F_{\kappa 22})} + P_2 \frac{F_{\kappa 22}}{(F_{\kappa 21} + F_{\kappa 22})}. \quad (6)$$

Віднімемо від правої та лівої частини цього рівняння величину $P_k \frac{F_{\kappa 21}}{(F_{\kappa 21} + F_{\kappa 22})}$. Тоді ма-

ємо:

$$P_k - P_k \frac{F_{\kappa 21}}{(F_{\kappa 21} + F_{\kappa 22})} = P_1 \frac{F_{\kappa 21}}{(F_{\kappa 21} + F_{\kappa 22})} - P_k \frac{F_{\kappa 21}}{(F_{\kappa 21} + F_{\kappa 22})} + P_2 \frac{F_{\kappa 22}}{(F_{\kappa 21} + F_{\kappa 22})}.$$

Після спрощення маємо:

$$\begin{aligned}
 P_k \left(1 - \frac{F_{k21}}{(F_{k21} + F_{k22})} \right) &= (P_1 - P_k) \frac{F_{k21}}{(F_{k21} + F_{k22})} + \frac{F_{k22}}{(F_{k21} + F_{k22})}; \\
 P_k \left(\frac{F_{k1} + F_{k2} - F_{k1}}{(F_{k21} + F_{k22})} \right) &= (P_1 - P_k) \frac{F_{k21}}{(F_{k21} + F_{k22})} + P_2 \frac{F_{k22}}{(F_{k21} + F_{k22})}; \\
 P_k \left(\frac{F_{k2}}{(F_{k21} + F_{k22})} \right) &= (P_1 - P_k) \frac{F_{k21}}{(F_{k21} + F_{k22})} + P_2 \frac{F_{k22}}{(F_{k21} + F_{k22})}; \\
 (P_k - P_2) \frac{F_{k22}}{(F_{k21} + F_{k22})} &= (P_1 - P_k) \frac{F_{k21}}{(F_{k21} + F_{k22})}.
 \end{aligned} \tag{7}$$

Звідси:

$$\left(\frac{P_1 - P_k}{P_k - P_2} \right) = \frac{F_{k22}}{F_{k21}}. \tag{8}$$

Особливість виразу (6) полягає в тому, що співвідношення перепадів тиску $(P_1 - P_k)$ та $(P_k - P_2)$ не залежить від абсолютного значення витрат колошникового газу F_{k21} та F_{k22} , а залежить тільки від їх співвідношення.

В сталому режимі $F_{k21} = F_{k22}$, а це означає, що в цьому режимі

$$(P_1 - P_k) = (P_k - P_2);$$

тобто

$$P_k = \frac{P_1 + P_2}{2}. \tag{9}$$

Таким чином, задане значення тиску газу на колошнику, яке треба автоматично підтримувати, повинно дорівнювати половині суми тиску горнових газів (тиску гарячого дуття) P_1 та тиску доменного газу у цеховому колекторі P_2 . Оскільки $P_{k1} \gg P_2$, то практично:

$$P_k = \frac{P_1}{2}. \tag{10}$$

Розглянемо тепер спосіб подачі гарячого дуття у ДП зі стабілізацією кількості (витрат) гарячого дуття $F_{20} = F_{20зад}$. Стабілізація кількості гарячого дуття при всіх інших незмінних умовах рівнозначно стабілізації кількості колошникового газу. Тому у подальшому будемо розглядати кількість колошникового газу F_{k21} та F_{k22} . Оскільки газопроникливість стовпа шихтових матеріалів (газодинамічний опір R_c) постійно змінюється, то для підтримання постійної кількості дуття, яке подається у піч, треба постійно змінювати тиск P_1 цього дуття. Тобто турбокомпресор повинен переходити із одної робочої характеристики на іншу (рис. 3).

Щоб кількість колошникового газу, яка проходить через стовп шихти зі змінним опором R_c , була постійною, треба відповідним чином змінювати тиск горнових газів (гарячого дуття) P_1 . При цьому тиск газу на колошнику P_k буде теж змінюватись, щоб в будь який момент забезпечити проходження постійної кількості колошникового газу. Тобто стабілізація P_k при постійній кількості дуття принципово неможлива. Крім того, постійна кількість газу, яка проходить через стовп шихти зі змінним опором, потребує змінного перепаду тиску $\Delta P = (P_1 - P_k)$, оскільки:

$$F_{k21} = \frac{1}{R_c} k_1 \sqrt{\Delta P} = \frac{1}{R_c} k_1 \sqrt{(P_1 - P_k)},$$

тут k_1 – коефіцієнт пропорційності.

Звідси:

$$\Delta P = (P_1 - P_k) = \frac{(F_{кз1})^2}{(k_1)^2} (R_c)^2 . \quad (11)$$

Якщо ми стабілізуємо кількість дуття, тобто $F_{кз1} = const$, то

$$\frac{(F_{кз1})^2}{(k_1)^2} = const = A, \quad (12)$$

$$\Delta P = A(R_c)^2 .$$

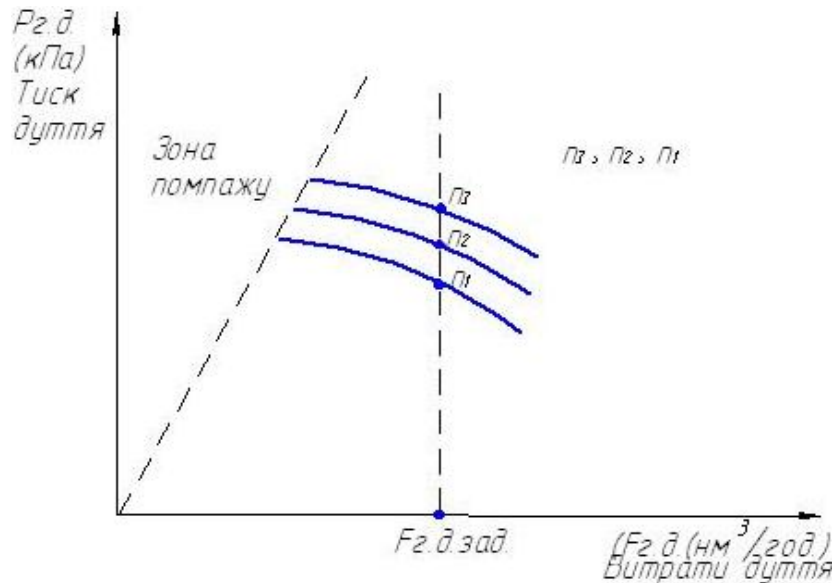


Рис. 3 – Робочі газодинамічні характеристики турбокомпресора при стабілізації витрат дуття

Тут величина R_c – газодинамічний опір стовпа шихтових матеріалів, який постійно змінюється, тому для стабілізації величини A треба відповідно змінювати ΔP . Це, в свою чергу, може призвести до такого підвищення тиску гарячого дуття P_1 , що стовп шихти може зупинитися. З урахуванням всього вище наведеного спосіб стабілізації кількості дуття, яке подають у ДП, не є доцільним. Практика ведення газодинамічного режиму доменних печей підтвердила це і тому автоматична стабілізація тиску гарячого дуття використовується практично на всіх доменних печах України.

Висновки

1. Одержано диференційне рівняння зміни тиску газу на колошнику доменної печі в залежності від балансу газу на колошнику і газодинамічного опору стовпа шихти.
2. В сталому режимі при автоматичній стабілізації тиску газу на колошнику задане значення цього тиску повинно складати половину тиску гарячого дуття.
3. Найбільш раціональним для доменної печі є спосіб подачі гарячого дуття з постійним тиском, при якому можлива автоматична стабілізація тиску газу на її колошнику.

Список використаних джерел:

1. Щедрин В.М. Теория доменной плавки под давлением / В.М. Щедрин. – М. : ГИИТЛ по черной и цветной металлургии, 1962. – Т. 1. – 279 с.
2. Тарасов В.П. Газодинамика доменного процесса / В.П. Тарасов. – М. : Металлургия, 1990. – 216 с.
3. Доменное производство : справочник / Под ред. И.П. Бардина. – М. : ГНТИ литературы по черной и цветной металлургии, 1963 – Т. 1. – 646 с.
4. Профос П. Регулирование паросиловых установок / П. Профос. – М. : Энергия, 1967. – 368 с.

5. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман. – М. : Высшая школа, 2003. – 479 с.

Bibliography:

1. Shedrin V.M. The theory of blast furnace smelting under pressure / V.M. Shedrin. – Moscow : SSTIL on ferrous and nonferrous metallurgy, 1962. – Vol. 1. – 279 p. (Rus.)
2. Tarasov V.P. Gasdynamics of the blast furnace process / V.P. Tarasov. – Moscow : Metallurgiya, 1990. – 216 p. (Rus.)
3. Blast furnace production : Reference book / Edited by I.P. Bardin. – Moscow : SSTIL on ferrous and nonferrous metallurgy, 1963. – Vol. 1. – 646 p. (Rus.)
4. Profos P. Regulation of steam power units / P. Profos. – Moscow : Energy, 1967. – 368 p. (Rus.)
5. Gmurman V.E. Probability theory and mathematical statistics / V.E. Gmurman. – Moscow : Vysshaya shkolal, 2003. – 479 p. (Rus.)

Рецензент: В.О. Маслов
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 02.10.2015

УДК 621.771.23.016.3-52

© Мірошніченко В.І.¹, Сімкін О.І.²

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ
ПРОЦЕСОМ ВОДОПОВІТРЯНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ
ЛИСТОВОГО ПРОКАТУ**

Проаналізовані основні методи моделювання об'єктів автоматизованого керування. Запропоновано метод багаторівневого моделювання об'єктів з багатовимірними цільовими функціями. На прикладі моделювання процесу водоповітряного охолодження (ВПО) листового прокату в умовах послідовного ВПО та при застосуванні водоповітряної суміші (ВПС) показано зменшення мінімально необхідної кількості ітерацій при використанні запропонованого методу вдвічі за підвищеною адекватності.

Ключові слова: математична модель, водоповітряне охолодження, листовий прокат, багатовимірна цільова функція.

Мирошніченко В.И., Симкин А.И. Повышение эффективности автоматизированного управления процессом водовоздушного охлаждения листового проката. Проанализированы основные методы моделирования объектов автоматизированного управления. Предложен метод многоуровневого моделирования объектов с многомерными целевыми функциями. На примере моделирования процесса водовоздушной охлаждения (ВВО) листового проката в условиях последовательного ВВО и при применении водовоздушной смеси (ВВС) показано уменьшение минимально необходимого количества итераций при использовании предложенного метода вдвое при повышенной адекватности.

Ключевые слова: математическая модель, водовоздушное охлаждение, листовой прокат, многомерная целевая функция.

V.I. Miroshnichenko, A.I. Simkin. Automated control of water-air cooling process for sheet products quality improving. An analysis of the main existing methods for modelling

¹ асистент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, vimasktp@rambler.ru

² канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, simkin@ukr.net