

151 АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 669.162.22

doi: 10.32782/2225-6733.43.2021.18

© Кравченко В.П.*

ОЦІНКА ВТРАТ ДУТТЯ ДОМЕННОЇ ПЕЧІ ПРИ НАДУВІ ПОВІТРОНАГРІВАЧА

Перед переводом нагрітого повітрянагрівача (ПН) в режим дуття в ньому необхідно підняти тиск до величини тиску холодного дуття. Цей процес називають надувом. При надуві нагрітого ПН частина холодного дуття береться з ПН, який знаходиться на дутті, і подається на нагрітий. Таким чином, певний час відбувається розгалуження потоку холодного дуття – основний потік на ПН гарячого дуття, а решта – на надув нагрітого. При цьому зменшується гідравлічний опір трубопроводної системи подачі холодного дуття і в цей період різко падає тиск в трубопроводі холодного дуття, що підтверджує зменшення масової кількості дуття на доменну піч. Для оцінки величини втрат дуття ДП під час надуву, ПН розглядається як закритий резервуар, на вхід якого поступає холодне дуття з певним тиском P_1 в трубопроводі перед блоком ПН і, в робочому просторі якого буде тиск P_2 . Під час надуву P_2 починає змінюватись від атмосферного до тиску холодного дуття. Зміна в часі тиску $P_2(\tau)$ залежить від тиску P_1 на вході ПН, ємності C ПН і гідравлічного опору R трубопроводу і перепускного клапану, через який відбувається надув. Одержано лінійне диференціальне рівняння першого порядку, яким описується ця залежність. Рішення рівняння показує експоненціальне збільшення тиску у ПН в процесі надуву, що підтверджує права частина експериментально одержаної в цей період кривої зміни тиску у трубопроводі холодного дуття. ПН вважається надутим, коли різниця $\Delta P = P_1 - P_2 \leq 5 \text{кПа}$. Час від моменту початку надуву до моменту, коли ΔP буде $\leq 5 \text{кПа}$, складає час надуву $\tau_{\text{над}}$. Знаючи час надуву $\tau_{\text{над}}$ і враховуючі, що через цей час $(P_1 - P_2) = 5 \text{кПа}$, із рівняння зміни тиску $P_2(\tau)$ знайдена стала часу $T_{\text{час}}$ цього рівняння. Виходячи із уявлення ПН, як резервуару певного об'єму, одержані вирази для визначення об'єму і маси дуття у ньому після надуву. Наведено приклад розрахунку масової і об'ємної кількості дуття під час надуву, які недоотримує ДП.

Ключові слова: доменна піч, холодне дуття, повітрянагрівач, надув, втрати дуття, компенсація втрат.

V.P. Kravchenko. Estimation of blast furnace blowing losses when inflating an air heater. Before turning the heated air heater (AH) to the blast mode, it is necessary to raise the pressure in it up to the value of the cold blast pressure. This process is called inflation. When the heated AH is inflated, part of the cold blast is taken from the AH, which is being inflated, and fed into the heated one. Thus, for a certain time there is a branching of the cold blast flow – the main flow goes to the AH of the hot blast, and part of it goes to the hot blast. As this takes place, the hydraulic resistance of the cold blast supply pipeline system decreases and during this period the pressure in the cold blast pipeline drops sharply, which is evidenced by the decrease in the mass quantity of blast to the furnace. To estimate the amount of the blast losses (BL) during inflation, the AH is considered as a closed tank, at the inlet of which cold blast is supplied with a certain pressure P_1 in the pipeline in front

* канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет, м. Маріуполь, kravchenko_vp@ukr.net

of the AH unit and, in the working space of which, there will be pressure P_2 . During the inflation, $P_2(\tau)$ begins to change from atmospheric pressure to cold blast pressure. The time variation of the pressure $P_2(\tau)$ depends on the pressure P_1 at the inlet of the AH, the capacity (C) of the AH and the hydraulic resistance (R) of the pipeline and the bypass valve through which the inflation is carried out. Taking these assumptions into account, a first-order linear differential equation has been obtained, which describes this dependence. The solution to the equation shows an exponential increase in pressure in the AH in the process of inflation, which confirms the right branch of the curve of pressure change in the cold blast pipeline obtained experimentally during this period.

Key words: blast furnace, cold blast, air heater (AH), inflation, blast losses, compensation of blast losses.

Постановка проблеми. По закінченню процесу нагріву повітрянагрівача (ПН) тиск в його робочому просторі дорівнює атмосферному. Тиск холодного дуття, яке він буде нагрівати, сягає більше 300 кПа, тому перед подачею дуття в ПН в його робочому просторі треба підняти тиск до тиску холодного дуття. Цей процес називають надувом ПН. Для надуву використовують те ж холодне дуття, що і на нагрів, і подачу в доменну піч (ДП). Це означає, що під час надуву ДП одержує дуття в меншій кількості, ніж до надуву. Зменшення дуття зменшує продуктивність печі, тому існує проблема оцінки величини цих втрат і необхідність їх компенсації під час надуву.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Впливу параметрів гарячого дуття (витрати, температура, вміст добавок, тощо) на роботу ДП присвячена значна кількість робіт. В [1, 2] розглядаються питання стабілізації температури дуття різними методами. Для стабілізації умов протікання доменної плавки необхідно мати стабільні витрати дуття. Це відмічається в [3-5]. Стабільність витрат дуття, разом зі стабільним хімічним складом і фізичними властивостями шихтових матеріалів, є фактором стабільності протікання процесів плавки і важливою умовою економії коксу. В роботі [4] аналізується практики роботи ДП і відмічається зниження кількості дуття, яке подається в піч, при надуві ПН.

Мета роботи. З метою забезпечення стабільних умов роботи доменної печі, необхідно проаналізувати коливання тиску холодного дуття на працюючих ДП в період надуву ПН і визначити величину втрат дуття в цей період.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо процес надуву ПН доменної печі, яка забезпечується дуттям по трубопроводу від турбокомпресора. Піч має блок із чотирьох ПН, кожен з яких після дуття стає на нагрів.

Від колектору трубопроводу холодного дуття стисле повітря іде на кожен ПН на клапани холодного дуття (КХД) і перепускний (ПК). При необхідності надуву нагрітого ПН частина холодного дуття береться з ПН, який знаходиться на дутті, і подається на ПК нагрітого. Таким чином, певний час відбувається розгалуження потоку холодного дуття – основний потік на ПН гарячого дуття, а решта на надув нагрітого.

Перед переводом нагрітого ПН в режим дуття в його робочому просторі необхідно підняти тиск до тиску холодного дуття, тобто виконати операцію надуву. Перед надувом ПН за допомогою системи клапанів герметизується, а потім частина холодного дуття від основного трубопроводу через перепускний клапан подається в робочій простір ПН. Момент вирівнювання тисків фіксується диференційним манометром.

При відчиненні перепускного клапану потік холодного дуття на піч роздвоюється – частина, як і раніше, йде через інший ПН на нагрів дуття і в піч, а частина на надув нагрітого ПН. При цьому зменшується гідравлічний опір всього тракту дуття – від ДП до турбокомпресора. Це перш за все відображається на параметрах холодного дуття в трубопроводі біля доменної печі. Такий процес для ДП об'ємом 2000 м³ показано на рис. 2 – тиск дуття зменшується на 10-12 кПа, а об'ємні витрати зростають (при цьому масові витрати залишаються незмінними).

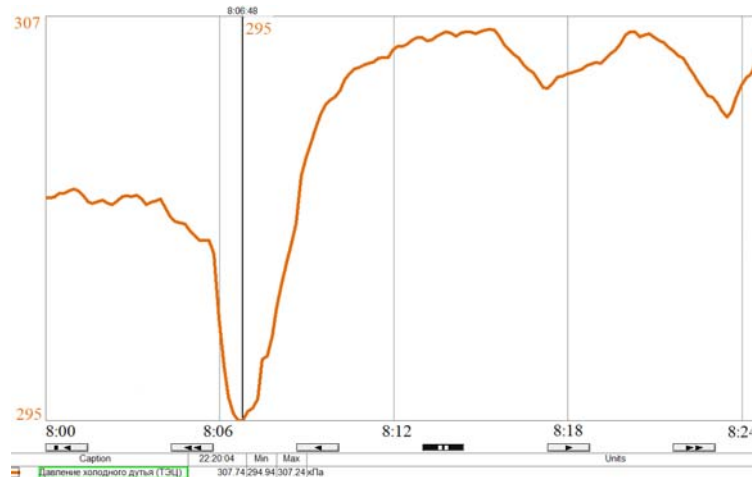


Рис.1 – Зміна тиску в трубопроводі холодного дуття перед ДП під час надуву одного із ПН

Оскільки масові витрати залишились незмінними, зниження тиску холодного дуття на 10-12 кПа призводить до відповідного зменшення тиску і кількості гарячого дуття, яке подається в ДП. Таким чином, піч в цей період недоотримує певну кількість дуття, що знижує інтенсивність плавки.

Для оцінки величини втрат дуття ДП під час надуву ПН позначимо тиск холодного дуття в трубопроводі перед блоком ПН P_1 , тиск в робочому просторі ПН, який надувається, – P_2 . Робочий простір ПН представляє собою резервуар, який перед надувом герметично зачинений і має атмосферний тиск $P_2 = P_{ат}$. При відчиненні ПК холодне дуття заходить в ПН і тиск в ньому починає збільшуватись. Через деякий час він досягає тиску дуття P_1 . На швидкість підняття тиску в резервуарі впливає його ємність C і гідравлічний опір R трубопроводу з перепускним клапаном на ньому [6]. Ємність визначається зміною об'єму газу ΔV , яка відповідає одиничній зміні тиску ΔP у ньому:

$$C = \frac{\Delta V}{\Delta p} \left[\frac{M^3}{Па} \right]. \quad (1)$$

Гідравлічний опір R є величиною, зворотною тангенсу кута нахилу витратної характеристики цього клапану:

$$R = \frac{dP}{dF} \left[\frac{Па}{M^3/c} \right]. \quad (2)$$

З урахуванням цих величин швидкість зміни тиску у ПН при його надуві буде визначатись рівнянням:

$$C \frac{dP_2}{d\tau} = \frac{P_1 - P_2}{R}. \quad (3)$$

Після перетворення одержуємо диференціальне рівняння першого порядку:

$$CR \frac{dP_2}{d\tau} + P_2 = P_1.$$

Величина $CR = T_{час}$ має розмірність часу, тому її називають сталою часу резервуара (робочого простору ПН). З урахуванням цього маємо:

$$T_{час} \frac{dP_2}{d\tau} + P_2 = P_1. \quad (4)$$

Рішенням цього рівняння при нульовому (надлишковому) початковому тиску у ПН є:

$$P_2(\tau) = P_1 \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T_{час}}} \right). \quad (5)$$

Таким чином маємо експоненціальне збільшення тиску у ПН в процесі надуву. Права частина кривої зміни тиску у трубопроводі холодного дуття (рис. 1) підтверджує справедливність цього рівняння.

ПН вважається надутим, коли різниця $\Delta P = P_1 - P_2 \leq 5$ кПа. Час від моменту початку надуву до моменту, коли ΔP буде ≤ 5 кПа, складає час надуву $\tau_{над}$. Знаючи час надуву $\tau_{над}$ і враховуючі, що $(P_1 - P_2) = 5$ кПа, із (5) знаходимо сталу часу $T_{час}$:

$$T_{\text{час}} = \frac{\tau_{\text{над}}}{\ln\left(\frac{P_1}{5}\right)}. \quad (6)$$

В процесі надуву витрати дуття на надув змінюються, спочатку вони максимальні, а потім по мірі зростання тиску в ПН вони зменшуються і при досягненні $\Delta P = P_1 - P_2 \leq 5 \text{кПа}$ стають рівними нулю. Характер зміни цих витрат, як і тиску, є експоненціальним. Із рівняння (1) знайдемо зміну витрат у робочому просторі ПН під час надуву:

$$\Delta V(\tau) = C \Delta p(\tau). \quad (7)$$

Підставляючи із (5) величину $\Delta p(\tau) = (P_1 - P_1(\tau)) = P_1 e^{-\frac{\tau}{T_{\text{час}}}}$, маємо формулу експоненціальної зміни кількості дуття в часі на надув ПН:

$$\Delta V(\tau) = C P_1 e^{-\frac{\tau}{T_{\text{час}}}}. \quad (8)$$

Оскільки при надуві ПН герметизується, тобто він представляє собою закритий резервуар з одним входом, то загальна об'ємна кількість надутого у ПН повітря $V_{\text{над}}$ в кінці надуву буде сталою і дорівнює об'єму порожнин ПН $V_{\text{ПН пор}}$ при будь яких робочих умовах:

$$V_{\text{над роб}} = V_{\text{ПН пор}}.$$

Робочі умови задаються кінцевим тиском P_2 дуття, яке знаходиться у ПН по закінченні надуву і температурою T_2 – дуття у ПН після надуву, яка дорівнює середній температурі $T_{\text{ПН сер}}$ нагрітого ПН:

$$T_2 = T_{\text{ПН сер}}.$$

Для визначення величини підвищення продуктивності турбокомпресору холодного дуття з метою компенсації втрат дуття важливо знати масову кількість дуття $Q_{\text{над}}(\tau_{\text{над}})$, яка пішла на надув. Масова кількість залежить від об'єму і густини газу. Для знаходження її помножимо об'ємну кількість дуття після надуву $V_{\text{над роб}}$ в робочих умовах на густину дуття в цих же умовах:

$$Q_{\text{над}}(\tau) = V_{\text{над роб}} \rho_{\text{пов } 0} \frac{T_0 P_2(\tau)}{P_0 T_2}. \quad (9)$$

Оскільки $V_{\text{над роб}}$, $\rho_{\text{пов } 0}$, P_0 , T_0 і T_2 – величини сталі, то рівняння (9) можна записати так:

$$Q_{\text{над}}(\tau) = V_{\text{над роб}} \rho_{\text{пов } 0} \frac{T_0}{P_0 T_2} P_2(\tau).$$

Підставляючи із (5) значення $P_2(\tau)$, маємо:

$$Q(\tau) = V_{\text{над роб}} \rho_{\text{пов } 0} \frac{T_0}{P_0 T_2} P_1 \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T_{\text{час}}}}\right) = k P_1 (1 - e^{-\frac{\tau}{T}}). \quad (10)$$

Тут $k = V_{\text{над роб}} \rho_{\text{пов } 0} \frac{T_0}{P_0 T_2}$.

Згідно рівнянню (10), масова кількість дуття, яке поступає у ПН під час надуву змінюється також експоненціально. При $\tau = \tau_{\text{над}}$ тиск у ПН $P_2(\tau_{\text{над}}) = (P_1 - 5) \text{кПа}$, тому загальна масова кількість дуття, яка знаходиться у ПН, тобто витратилась на надув, дорівнює:

$$Q_{\text{над}}(\tau_{\text{над}}) = k P_1 (1 - e^{-\frac{\tau_{\text{над}}}{T_{\text{час}}}}).$$

Остаточно:

$$Q_{\text{над}}(\tau_{\text{над}}) = V_{\text{над роб}} \rho_{\text{пов } 0} \frac{T_0}{P_0 T_2} (P_1 - 5) = k(P_1 - 5). \quad (11)$$

По величині $V_{\text{над роб}}$ і $Q_{\text{над}}(\tau_{\text{над}})$ можна оцінити величину економічних втрат ДП від недоотримання дуття на цю величину.

Розглянемо приклад. На ДП об'ємом 2000 м^3 , яка забезпечується дуттям по трубопроводу діаметром $D_u = 1600 \text{ мм}$ і довжиною 900 м , встановлено чотири ПН. Приймемо, що кожен з них має об'єм порожнин $V_{\text{ПН пор}} = 400 \text{ м}^3$. Фактичні середні об'ємні витрати холодного дуття на піч $F_{\text{хд}} \phi = 3600 \text{ нм}^3/\text{хв}$, тиск $P_1 = 320 \text{ кПа}$ і температура $T_1 = 100^\circ\text{C}$. Середня температура всередині нагрітого повітрянагрівача $T_{\text{ПН сер}} = 1200^\circ\text{C}$.

Оскільки ПН при надуві є закритим резервуаром, то об'єм його порожнин є накопиченою об'ємною кількістю дуття, яка знаходиться в робочих умовах:

$$V_{\text{над роб}} = V_{\text{ПН пор}}.$$

Візьмемо для даного прикладу $V_{\text{над роб}} = V_{\text{ПН пор}} = 400 \text{ м}^3$.

Для постійного об'єму газу маса газу в ньому визначається його густиною $\rho_{\text{пов}}$, яка залежить від робочих умов. Підставляючи ці дані у формулу (12), одержимо сумарну масову кількість дуття, яка накопичилась у ПН після надуву:

$$Q_{\text{над}}(\tau_{\text{над}}) = V_{\text{ПН пор}} \rho_{\text{пов } 0} \frac{T_0}{P_0 T_2} (P_1 - 5) = 400 \cdot 1,294 \cdot \frac{273,15}{101,325 \cdot (1200 + 273,15)} (421,325 - 5) = 394 \text{ кг.}$$

Накопичений за час надуву об'єм дуття в нормальних умовах буде дорівнювати:

$$V_{\text{над норм}} = \frac{Q_{\text{над}}(\tau_{\text{над}})}{\rho_{\text{пов } 0}} = \frac{394}{1,294} = 305 \text{ нм}^3.$$

Прийmemo, що надув нагрітих ПН одної ДП відбувається кожні 1,5 год, тоді за добу загальна кількість надувів $24/1,5 = 16$. Таким чином, доменній печі буде недодано за добу $305 \times 16 = 4880 \text{ нм}^3$ дуття,

що обумовлює певні економічні втрати.

Для запобігання втрат дуття необхідно розробити систему автоматичного контролю і управління процесом надуву ПН. При цьому система повинна змінювати режим роботи турбокомпресора дуття так, щоб за період надуву компенсувати ці втрати.

Висновки

1. Одержані експериментальні дані зміни тиску в трубопроводі холодного дуття під час надуву одного із ПН, які підтверджують втрати дуття ДП.
2. Теоретично показана експоненціальна зміна тиску і витрат дуття на надув ПН.
3. Оцінена величина втрат дуття доменною піччю під час надуву ПН, внаслідок яких погіршуються економічні показники роботи ДП.

Перелік використаних джерел:

1. Доменные воздухонагреватели / Ф.Р. Шкляр [и др.]. – М. : Metallurgiya, 1982. – 176 с.
2. Грес Л.П. Теплообменники доменных печей / Л.П. Грес, С.А. Карпенко, А.Е. Миленина. – Днепропетровск: «Пороги», 2012. – 491 с.
3. Остроухов М.Я. Форсирование доменной плавки / М.Я. Остроухов – М. : Metallurgizdat, 1956. – 220 с.
4. Жеребин Б.Н. Практика ведения доменной плавки / Б.Н. Жеребин. – М. : Metallurgiya, 1980. – 248 с.
5. Попов А.А. Газовщик доменной печи / А.А. Попов, Ю.А. Попов. – М. : Metallurgiya, 1966. – 155 с.
6. Эрриот П. Регулирование производственных процессов / П. Эрриот. – М. : Энергия, 1967. – 480 с.

References:

1. Shkliar F.R., Malkin V.M., Kashtanova S.P., Kalugin Ia.P., Sovetkin V.L. *Domennye vozdukhonagrevateli* [Blast furnaces]. Moscow, Metallurgiiia Publ., 1982. 176 p. (Rus.)
2. Gres L.P., Karpenko S.A., Milenina A.E. *Teploobmenniki domennykh pechei* [Blast furnace heat exchangers]. Dnipropetrovsk, Porogi Publ., 2012. 491 p. (Rus.)
3. Ostroukhov M.Ia. *Forsirovanie domennoi plavki* [Forcing blast-furnace smelting]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1956. 220 p. (Rus.)
4. Zherebin B.N. *Praktika vedeniia domennoi plavki* [Blast Furnace Smelting Practice]. Moscow, Metallurgiiia Publ., 1980. 248 p. (Rus.)
5. Popov A.A., Popov Iu.A. *Gazovshchik domennoi pechi* [Blast furnace gasman]. Moscow, Metallurgiiia Publ., 1966. 155 p. (Rus.)
6. Erriot P. *Regulirovanie proizvodstvennykh protsessov* [Regulation of production processes]. Moscow, Energiia Publ., 1967. 480 p. (Rus.)

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

Стаття надійшла 21.09.2021