

5. Техніко-економічні наслідки методів інтенсифікації доменного процесу

5.1 Нагрів дуття

Підвищення нагрівання дуття є одним з найбільш ефективних методів інтенсифікації доменного процесу.

Інтенсифікація – це прискорення протікання окремих складових доменного процесу з метою підвищення питомої продуктивності доменної печі, що досягається створенням сприятливих умов для їхнього протікання з меншою витратою коксу на одиницю чавуну.

Одним з головних методів інтенсифікації доменного процесу є нагрівання дуття. У 1829 р. на шотландському заводі Клайд Д. Нельсоном випробуване нагрівання дуття до 149°C , а в 1831 – до 316°C . Ніяке інше нововведення не дало такої економії у виді зниження витрати коксу, як це.

На багатьох західних заводах до кінця 19 століття температура дуття була вже на рівні $800 - 900^{\circ}\text{C}$.

У Росії й Україні це нововведення почали застосовувати тільки з 20 століття. У 1977 р. у СРСР середня температура дуття складала 1068°C , до 1988 р. на деяких заводах (Череповецькому, ММК, Запоріжсталі) вона досягла 1200°C .

Докладний аналіз змін технології плавки в результаті підвищення нагрівання дуття приведений у роботах А.Н. Рамма [6].

Варто виділити наступні основні зміни в ході доменного процесу:

- Скорочення витрати вуглецю на фурмах.

Фізичне тепло нагрітого дуття ($\dot{v}_d * t_d$, кДж/кгСф) замінює собою частину тепла, яка утворюється горінням вуглецю коксу у фурмах (ω_c , кДж/кгСф). Зменшення кількості вуглецю, що згоряє на фурмах, визначається з рівняння:

$$(\omega_c + \dot{v}_d * t_d) * C_{\phi} = (\omega_c + v_d * t'_d) * C''_{\phi} \text{ і складає (\%):}$$

$$\Delta C_{\phi} = (1 - C''_{\phi} / C_{\phi}) * 100 = \frac{i''_d - i'_d}{\omega_c / v_d + i''_d} * 100; \quad (2.1)$$

де t'_d і t''_d – ентальпія дуття при менш і більш нагрітому дутті (без теплоти розкладання вологи), кДж /м³.

C''_{ϕ} , C_{ϕ} – відповідні витрати вуглецю на фурмах, кг/т чавуну.

Так при $\omega_c = 9800$ кДж/кг, $\omega = 0,21$, $\phi = 0,01$ і $v_d = 4,341$ м³/кг перехід від холодного дуття ($t_d = 0^{\circ}\text{C}$, $t'_d = -108$ кДж/м³) до дуття, нагрітого до 1000°C ($t''_d = 1319$ кДж/ м³), супроводжується економією вуглецю:

$$\Delta C_{\phi} = \frac{(1319 + 108)}{9800 / 4,341 + 1319} * 100 \approx 40\%$$

Фактична економія C_{ϕ} більше у зв'язку зі зменшенням витрат тепла з колошниковим газом. З цього рівняння також випливає, що кожні наступні 100°C нагрівання дають меншу економію C_{ϕ} , чим попередні, тому що t''_d росте примірно пропорційно підвищенню температури дуття.

- Перерозподіл температур газів по висоті доменної печі.

При збільшенні температури дуття на 100°C теоретична температура горіння зростає на 60°C . При цьому міняється розподіл температур по висоті доменної печі: температура газів підвищується в нижній частині печі (у горні і заплічках) і знижується у верхній (у шахті). Залежність температури колошникового газу від температури дуття можна виразити рівнянням:

$$t_{к.г.} = t_{к.г.}^0 / (0,5 + 0,0005 t_d),$$

де t° к.г.- температура колошникового газу при $t_d = 1000^{\circ}\text{C}$.

Темп зниження t° к.г. зі збільшенням t_d зменшується: при низьких t_d він складає $40 - 60^{\circ}\text{C}$, при $700 - 900 - 25^{\circ}\text{C}$, а при $1000 - 1100 - 15^{\circ}\text{C}$ (Рис. 5.1.1)

- Зміна ступеня прямого відновлення

Зі збільшенням нагрівання дуття зменшується витрата вуглецю на фурмах і кількість оксиду вуглецю, що утворюється, на одиницю чавуну; при цьому також знижується температура шахти печі. У зв'язку з цим знижується ступінь непрямого відновлення, а ступінь прямого – зростає. Залежність rd від t''_d можна приблизно відобразити рівнянням:

$$r_d = r_d^0 (0,684 + 0,01 t_d^{0,5}),$$

де r_d^0 - ступінь прямого відновлення при $t_d = 1000$ °С.

Збільшення змісту CO_2 у колошниковому газі, що спостерігається при цьому, обумовлене тим, що витрата коксу і загальний вихід колошникового газу зменшуються в більшій мірі, чим абсолютна кількість CO_2 .

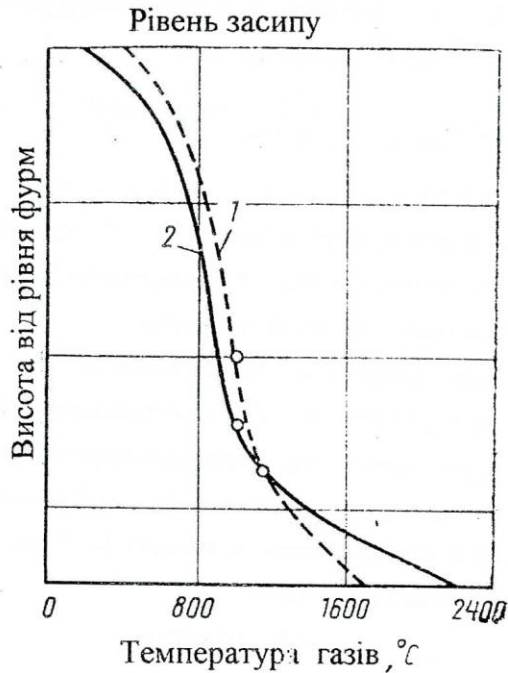


Рисунок 5.1.1 Розподілення температури газів по висоті доменної печі при низькій (1) і високій (2) температурах дуття

- Зміна корисної витрати тепла

При збільшенні температури дуття знижується витрата коксу на 1 т чавуну і, як наслідок, зменшуються кількість золи і сірки, внесені їм. Також знижується витрата флюсу для їхнього ошлакування і зменшується вихід шлаку, що в результаті знижує корисну витрату тепла, а значить отримується додаткова економія коксу.

- Зміна інтенсивності плавки та її продуктивності.

Інтенсивність плавки, як відомо, залежить насамперед від газопроникності шихти. Зі збільшенням t^0 , знижується відносна витрата коксу і зменшується його об'ємна частка в шихті, що знижує газопроникність шару шихти, зростає перепад тисків при незмінному об'ємі газів (ΔP) і тиск дуття (P_d).

Наприклад, на ММК при збільшенні t^0 на кожні 100°С в межах 700-1000°С перепад тиску зростає на 5 кПа. Тому, якщо доменна піч працює на граничному (для збереження рівності ходу) перепаду, то підвищення t^0 вимагає деякого зниження інтенсивності. Слід зазначити, що більш значно зростає перепад у нижній частині печі, тобто що лімітуючою є нижня зона – горн і распар.

З ростом t^0 , спостерігається таке позитивне явище, як збільшення довжини зони циркуляції газів і коксу. Довжина цієї зони зростає зі збільшенням кінетичної енергії дуття, пропорційної квадрату його температури.

Однак, збільшення довжини зон горіння не перекриває погіршення газопроникності шихти, у результаті інтенсивність плавки необхідно знижувати при підвищенні t^0 .

Проте, відносна витрата коксу зменшується в значно більшій мірі, чим інтенсивність його спалювання, тому питома продуктивність доменної печі зі збільшенням t^0 зростає:

$$P = \frac{I_x}{K'}, \quad P = \frac{I}{\eta}$$

де η - коефіцієнт використання корисного об'єму, м³/т. добу

На рис.5.1.2 надані результати розрахунку впливу t^0 на показники доменної плавки.

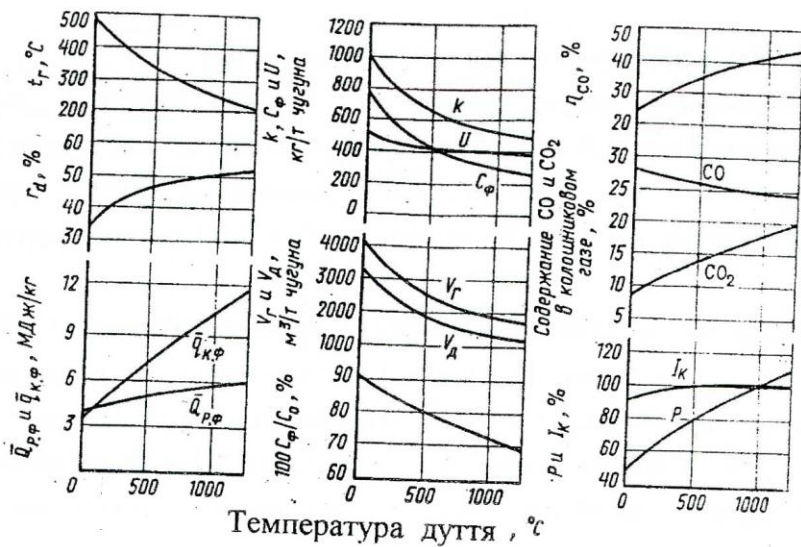


Рисунок 5.1.2 Вплив температури дуття на показники доменної плавки

Вивченням впливу нагрівання дуття на результати доменної плавки займалися багато вчених – (Готліб А.Д., Бабарикін М.М., Галатов А.Л.).

Бабарикін М.М. запропонував у результаті своїх досліджень формулу, що визначає відносну економію коксу при підвищенні температури дуття на 100°C:

$$\Delta K = 1830/t_0 + 0,58\%$$

За даними Галатова А.Л., на ММК інтенсивність спалювання коксу знижувалась на 2,02 – 2,4 % на кожні 100°C підвищення t_0 , а рудне навантаження ($P_H = P/K$) зростало на 4,0 – 4,5%.

Ретельні дослідження в Німеччині, на заводі в Рурорті на печі об'ємом 980 м³ показало збільшення зони непрямого відновлення по висоті печі на 20%.

- Зміна ефективності нагрівання дуття при вдуванні природного газу й інших заміників коксу.

Ефективність підвищення нагрівання дуття різко зростає при вдуванні в горн заміників коксу, що мають більш низьку теплопровідну здатність і супутнє збільшення горнових газів. Прикладом може служити природний газ, при вдуванні і згорянні якого виділяється тепла майже в два рази менше (у порівнянні з коксом), а газу утворюється в два рази більше, внаслідок чого знижується прихід тепла в горн. На рис.5.1.3 представлена розрахункова залежність між витратою природного газу (100% CH₄), температурою дуття і теоретичною температурою горіння.

Вдування природного газу тим ефективніше, чим нижче теоретична t^0 горіння. При цьому зменшується об'єм газів, а інтенсивність горіння коксу знижується не так сильно. У горновому газі збільшується кількість CO і H₂, при цьому збільшується ступінь використання газу, росте ступінь непрямого відновлення (γ) і знижується ступінь прямого (γ_d).

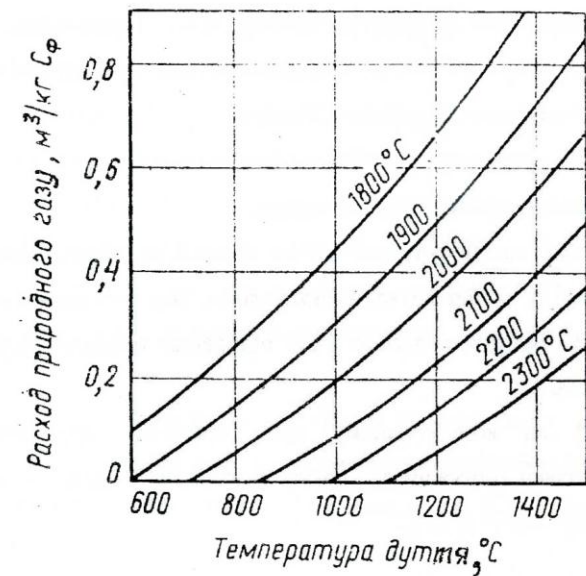


Рисунок 5.1.3 Витрати природного газу (100% CH₄), які відповідають теоретичній температурі (°C), при різних температурах дуття.

Як видно з приведеного графіка, нагрів дуття з 1100 до 1200°C при теоретичній температурі горіння рівній 1900°C дозволяє збільшити витрати природного газу на 0,1 м³/кгСф. Якщо Сф = 275 кг/т чавуну і коефіцієнт заміни коксу газом дорівнює 0,8 кг/м³, то економія коксу при цьому дорівнює:

$$\Delta K = 0,1 \cdot 0,8 \cdot 275 = 22 \text{ кг/т.}$$

Якщо підвищувати нагрівання дуття з 1100 до 1200 °С без вдування природного газу, то економія коксу дорівнює тільки 15 кг /т.

Таким чином, можна зробити висновок, що спільне застосування підвищеного нагрівання дуття і природного газу дозволяє компенсувати негативні сторони їхнього впливу на доменний процес.

Граничне й оптимальне нагрівання дуття.

В останні роки спостерігається швидке підвищення нагрівання дуття у всіх країнах, що обумовлено наступним:

- Поліпшенням гранулометричного складу шихти в результаті підвищення частки огрудкованих матеріалів у ній і збільшенням міцності коксу;
- Підвищенням тиску газу на колошнику;
- Вдуванням у горн природного газу і зволоження дуття;
- Застосуванням офлюсованого агломерату.

Як показує практика, в сучасних умовах нормальна робота доменних печей на атмосферному дутті без вдування природного газу можлива з нагріванням дуття до 1150°C, що при вологості 1-2% відповідає теоретичній температурі горіння 2250-2300°C.

При роботі на комбінованому дутті гранична температура дуття визначається тільки потужністю повітрянагрівачів і була б економічно вигідною на рівні 1400 – 1500°C.

5.2 Зволоження дуття

У 1894 р. Дж. Гейм одержав патент на «метод витягу вологи з дуття для доменних печей», а в 1904 р. увів в дію промислову установку по осушенню дуття селікогелем у США. В результаті дії установки при зменшенні вологи дуття з 1,6 до 0,5% витрата коксу знизилася на 19,6%, а продуктивність зросла на 24,7%. Перевірка цих результатів у Канаді й Англії підтвердила такі дані, однак через високу вартість установки, цей метод не одержав поширення.

У 1939 у США запропонували метод підтримки вологи дуття на постійному рівні. ДО 1942 р. було введено більш 10 таких установок (проектувалося 20). Це привело до зниження витрати коксу на 14% і збільшення продуктивності на 2,5% на заводі в Удворті. На інших заводах результати були гірше: в Алабамі одержали зниження витрати коксу на 4,3% і збільшення продуктивності печі на 16%. Після війни це питання було знято.

Досвіди Афанасьєва А. П. і Габриєля Л. Я. у 1940 р. на КМК і ММК показали, що зволоження дуття до 2-5% при підвищенні температури дуття дають позитивний результат. У 1959 р. 108 печей з 118-ти працювало на підвищеній і постійній вологості. При цьому одержували зниження витрат коксу на 2-5% і підвищення продуктивності на 5-15%, однак з початком використання природного газу цей метод став поступово забуватися. Зараз печі, що використовують природний газ працюють на природній вологості дуття.

В останні роки в Японії видано багато патентів на осушення дуття. Упровадження цього заходу привело до зниження витрат коксу на 0,7-0,8 кг/т чавуну при видаленні 1г вологи з 1 м³ дуття (або 6 кг/т чавуну на 1% вологості дуття).

Вологість повітря коливається як по місяцях, так і в плинні доби. Амплітуди коливань абсолютної вологості повітря по добі досягають 3,0% середньорічної, у межах доби коливання досягають 0,8% (рис. 5.2.1).

Поблизу водойму коливання вологості дуття може бути більшим, тому

тут варто встановлювати кондиціонери для підтримки вологи повітря на постійному рівні.

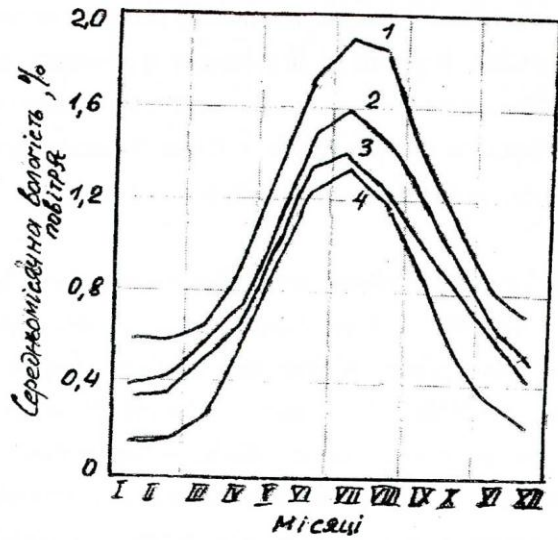


Рисунок 5.2.1 Сезонні коливання атмосферної вологості в різних географічних районах: 1 - Приазов'я, 2 - Придніпров'я, 3 — Донбас, 4 - Урал

5.2.1 Вплив вологості дуття на параметри дуття і горнового газу

Підвищення вологи дуття супроводжується зменшенням витрати дуття та виходу фурменого газу на 1 кг згоряючого на фурмах вуглецю коксу, підвищенням концентрації оксиду вуглецю та, ще в більшій мірі, водню в фурменому газі та зниженням вмісту азоту в ньому.

Вплив вологості на параметри дуття і горнового газу визначається наступними виразами:

$$V_d' = 0,933 / (\omega + 0,5\phi), \text{ м}^3 / \text{кг} \cdot C_\phi$$

$$\bar{V}_d = \frac{0,5(\bar{C}) + (\bar{O})}{\omega + 0,5\phi}, \text{ м}^3 / \text{м}^3 (\text{кг}) \text{ палива}$$

$$V_r' = 1,8667 + V_d'(1 - \omega + \phi), \text{ м}^3 / \text{кг} \cdot C_\phi$$

$$\bar{V}_r = (\bar{C}) + (\bar{H}) + (\bar{N}) + \bar{V}_d(1 - \omega + \phi), \text{ м}^3 / \text{м}^3 (\text{кг}) \text{ палива}$$

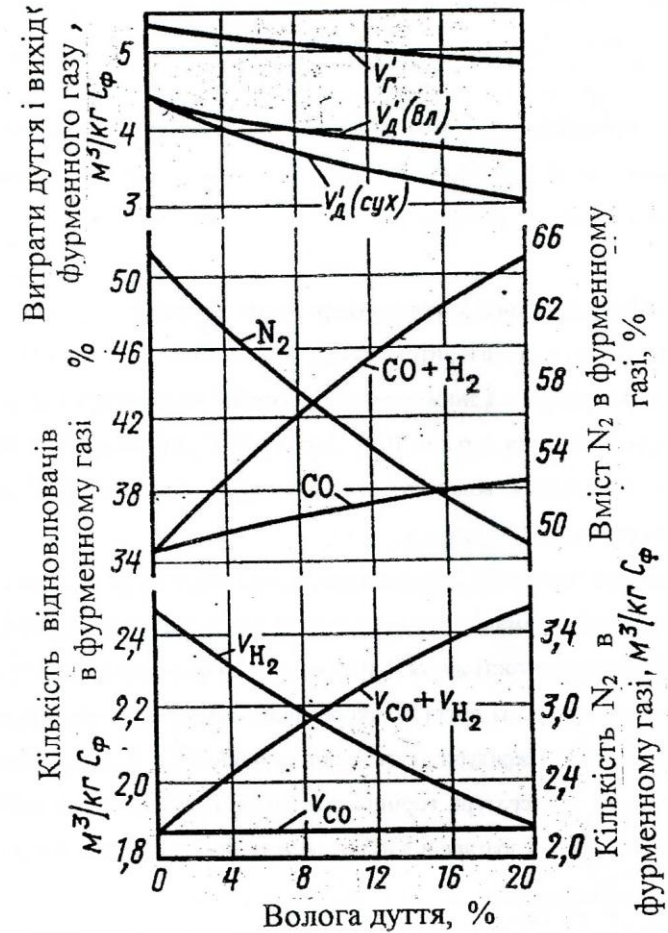
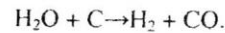


Рисунок 5.2.2. Вплив вологості дуття на його витрати, на вихід та склад фурменого газу

Видно, що збільшення частки відновлювальних газів відбувається за рахунок збільшення в дутті частки O_2 і H_2 вологи:



Зміст азоту за рахунок CO і H₂ зменшується.

Розкладання вологості дуття закінчується на більшій відстані від устя фурми, чим вуглекислого газу.

Кількість кисню, внесеного вологою визначається з рівняння:

$$\Delta\omega = 0,185 \frac{\varphi - 0,01}{1 + 1,5\varphi}$$

Збільшення вологості дуття з 1 до 5% рівносильно впливу на V_r збільшення змісту кисню в дутті на 0,7%, а по впливу на сумарну величину відновлювачів рівносильна збагаченню дуття на 3%.

5.2.2 Вплив вологи дуття на теоретичну температуру горіння

На розкладання вологи витрачається 10800 кДж/м³ води чи 13440 кДж/кг води, що супроводжується зниженням теоретичної температури горіння на 40-45° на 1% вологості дуття перших 10% і на 30-35° при вологості дуття більш 10%. Тому збільшення вологості дуття є ефективним засобом зниження температури горна.

Розрахунки показують, що при низькій вихідній вологості дуття (0 – 2%) збільшення її на 1% вимагає для компенсації тепла підвищення нагріву дуття близько 80°С, при вологості дуття 8-10% ця компенсація зменшується до 60°С. Для компенсації вологості дуття по теоретичній температурі горіння потрібно менше збільшення температури дуття – лише на 60-50°С / % H₂O відповідно.

Теоретична температура горіння при використанні вологого дуття може бути збережена шляхом збагачення дуття киснем на (0,9-1,0%)O₂/% H₂O.

5.2.3 Вплив вологи дуття на процес горіння коксу на фурмах

Підвищення вологи дуття викликає збільшення зон горіння від уповільнення процесу горіння при зниженні температури горна. При компенсації збільшення вологості підвищенням температури дуття зміни

параметрів зони горіння не відбувається. Однак, водяна пара розкладається за межами існування вуглекислого газу, що подовжує окисну зону. Виникає протиріччя того, що вода повинна раніш реагувати з вуглецем коксу, ніж з вуглекислим газом. В роботі [6] автор пояснює цю взаємодію не кінетичними, а термодинамічними умовами: при температурі більш 810°С водяний пар є більш міцним, ніж вуглекислий газ. Крім того, в окисній зоні вуглекислого газу більше, ніж водяної пари, тому останній реагує тільки після зникнення вуглекислого газу. З цієї причини збільшення розмірів окисної зони визначається наявністю води.

5.2.4 Вплив вологи дуття на ступінь непрямого відновлення

Зволоження дуття приводить до збільшення виходу відновлювальних газів (CO + H₂) м³/кг·С_ф і їх концентрації в фурменому газі, що повинно прискорити відновлювальні процеси і зменшити ступінь прямого відновлення за рахунок водню насамперед. Причому, прискорюючий вплив водню пропорційний його концентрації.

У порох, недоступних для CO, H₂O взаємодіє з CO, H₂ повертається до Fe_xO_y, а CO₂ дифундує, тобто водень багаторазово взаємодіє з оксидами заліза і збільшує ступінь використання газів. Дослідження на заводі Дзержинського показали збільшення ступені непрямого відновлення (r₁) на 3,3% на кожний 1% підвищення вологи дуття.

На доменній печі в Геттінгені (Німеччина) ця величина склала ~2,7%.

5.2.5 Вплив на хід печі

Підвищення вологості дуття приводить до вирівнювання ходу печі, усуваючи обриви (досвід Донецького металургійного заводу) і сприяє зростанню температури дуття і об'єму дуття.

Причини, що призводять до поліпшення ходу печі та можливості підвищення інтенсивності шлавки:

- 1) збільшення вологості дуття усуває вплив коливання природної вологості повітря;
- 2) збільшення вологості дуття приводить до підвищення змісту водню, що спричиняє зниження в'язкості газу; у результаті підвищується швидкість газів, не змінюючи ΔP (швидкість газу збільшується на 0,4% / 1% вологи дуття);
- 3) вихід фурменого газу знижується на 0,5% на 1% вологи дуття, тому при $\Delta P = \text{const}$ це дозволяє підвищити кількість C_{ϕ} , що спалюється в одиницю часу;
- 4) збільшення вологості дуття без температурної компенсації приводить до зниження теоретичної температури горіння і температури горна;
- 5) збільшення вологості дуття приводить до підвищення розміру окисної зони і горіння вуглецю коксу більш рівномірне по перерізу печі при збільшенні обсягу зон, що поліпшує сход шихти.

Однак, механізм впливу підвищення вологості дуття дотепер цілком не вирішений.

Узагальнюючи застосування вологості дуття В. Т. Басов [6] зробив висновок: підвищення вологості дуття з 1% до 3% знижує витрату коксу на 0,9%, а збільшення продуктивності дорівнює 3,2% на 1% вологи дуття. Ці величини були б більшими при точному розрахунку і реалізації компенсацій 1% водяної пари температурою дуття.

5.3 Збагачення дуття киснем

Збагачення дуття киснем запатентоване Г. Бессемером у 1876 р. Перша плавка з використанням технологічного кисню (до 22,8% у дутті) проведена у Угрі (Бельгія) в 1913 р. Відзначено збільшення продуктивності на 12% і незначне зниження витрати коксу.

У СРСР широке застосування збагачене дуття знайшло з початком використання природного газу з 1957 р., а в 1977р. вже 89 печей (65%)

працювало на комбінованому дутті з середнім змістом кисню 26,2%.

На Заході збагачення дуття киснем поширення не одержало.

5.3.1 Вплив збагачення дуття киснем на технологію

Збагачення дуття киснем (рис. 5.3.1) супроводжується зниженням витрат дуття на 1 кг вуглецю, який згоряє на фурмах (V'_d) і відносно меншим зменшенням об'єму фурменого газу (V'_r), $\text{м}^3/\text{кг } C_{\phi}$:

$$V'_d = \frac{0,933}{\omega + 0,5\phi}$$

$$V'_r = 1,87 + V'_d(1 - \omega + \phi)$$

Співвідношення об'ємів дуття та фурменого газу:

$$\frac{V'_d}{V'_r} = \frac{1}{1 + \omega + 24}$$

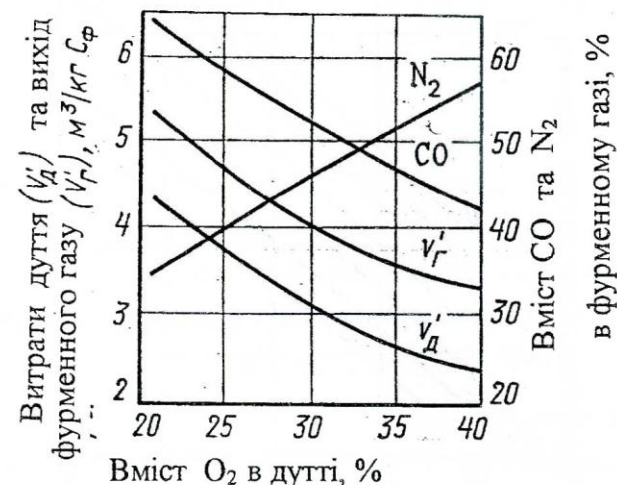


Рисунок 5.3.1 Вплив концентрації кисню в дутті на витрати дуття, вихід та склад фурменого газу (вологість дуття 1%).
(На кривих замість CO читати N₂, замість N₂ - CO)

Зі збільшенням концентрації кисню в дутті зростає концентрація оксиду вуглецю в фурменому газі, %l%: $CO=(2\omega+\varphi)/(1+\omega+2\varphi)$ і зменшується зміст азоту:

$$N_2 = \frac{1-\omega}{1+\omega+2\varphi}$$

Збільшення концентрації кисню в дутті супроводжується зростанням теоретичної температури горіння:

$$t_{\text{т}} = \frac{\omega_c + i_c + V_d i_d}{C_a V_2}$$

ω_c – теплота горіння вуглецю коксу в CO, кДж/кг.

Температура збільшується внаслідок зменшення об'єму фурмених газів: на кожен додатковий відсоток кисню в дутті її ріст складає 45-50°C. При зазначених на рис. 5.3.2 параметрах дуття її максимально припустиме значення 2500°C досягається вже при концентрації 26% O₂ в дутті.

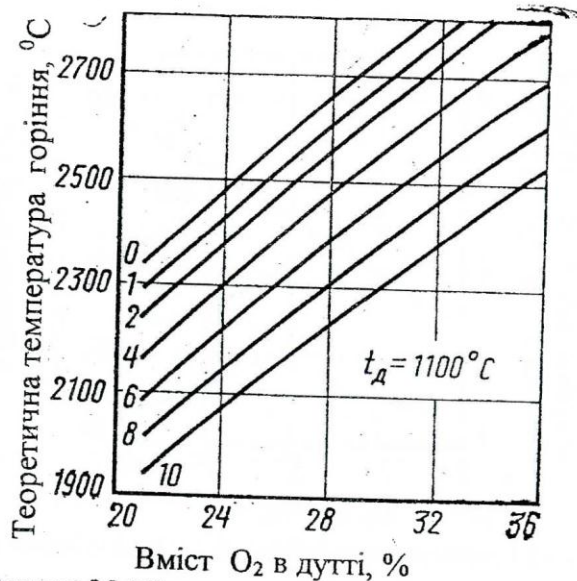


Рисунок 5.3.2 Вплив концентрації кисню в дутті на теоретичну температуру горіння ($\omega_c = 9800$ кДж/кг С; $i_c = 1475$ ° С; $t_d = 1100$ ° С, цифри у кривих - вологість дуття, %)

Зменшення концентрації N₂ і збільшення t_{т.г} прискорюють процес горіння вуглецю коксу зі зменшенням обсягу фурменого вогнища.

Це зменшення зникає при збільшенні інтенсивності горіння коксу у 1,5 рази за рахунок підтримки $\Delta P_{\text{заг}} = \text{const}$.

Збільшення t_{т.г} дозволяє успішно плавити феросплави, що при звичайному дутті плавити важко або неможливо. Добре плавляться і Fe-сплави з тугими шлаками типу портландцементу, у яких багато вільних CaO, Al₂O₃ і MgO.

При плавці ж переробного чавуну збагачення дуття киснем може застосовуватися разом з підвищенням вологи дуття чи природним газом або мазутом.

Підвищення вмісту кисню в дутті у результаті знижує величину загального перепаду $\Delta P_{\text{заг}}$, тому інтенсивність можна збільшити до досягнення вихідного $\Delta P_{\text{заг.онт}}$. При цьому продуктивність (П) зростає пропорційно (за умови постійної витрати газу в одиницю часу при роботі печі на атмосферному та збагаченому дутті):

$$P_{\omega}/P_{21} = V_{\text{г}}^{21}/V_{\text{г}}^{\omega}$$

де P₂₁, P_ω, V_г²¹, V_г^ω – відповідно продуктивність (т/добу) і витрати газу м³/т чавуну до (21) і після (ω)збагачення дуття.

Вихід колошникового газу при відсутності карбонатів і гідратів у шихті дорівнює: $V_{\text{кол}} = C_{\text{ф}} V_{\text{г}}' + C_{\text{д}} \cdot 22.4/12$, а при середньому відношенні C_д/C_ф=0,3:

$$V_{\text{кол}} = C_{\text{ф}} (V_{\text{г}}' + 0,56)$$

При однакових відносних витратах коксу на атмосферному та збагаченому дутті і однакових значеннях C_ф та C_д і V_{г(21)}}'=5,34 м³/кг·C_ф одержимо:

$$\frac{P_{\omega}}{P_{21}} = 5,9 (V_{\text{г}\omega}' + 0,56)$$

Зміни V_г' , P_ω, ΔP_ω , розраховані згідно вище наведеним виразам, при збагаченні дуття киснем приведено на рис.5.3.3 і в табл. 5.3.1

Таблиця 5.3.1 Вплив збагачення дуття киснем на P_{ω} і V_r

$\omega, \%$	21	25	30	35	40
$V_r, \text{м}^3/\text{кг}\cdot\text{C}_{\phi}$	5,34	4,65	4,04	3,60	3,27
$P_{\omega}, \%$	100	113,4	128,4	142,0	164,0
$\Delta P, \%/ \omega$	-	3,3	3,0	2,7	2,4

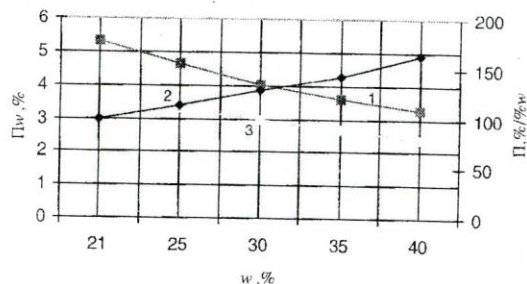


Рисунок 5.3.3 Вплив концентрації кисню в дутті на об'єм фурменого газу (1) і продуктивність печі (2), зміна продуктивності (3)

Видно, що в міру збагачення дуття киснем питомий ріст P зменшується з 3,3 при $O_{2\text{д}}=21-25\%$ до 2,4 $\%/ \omega$ при $O_{2\text{д}}=35-40\%$. Ці дані збігаються з промисловими результатами по збагаченню дуття киснем.

Характер розподілу температур при збагаченні дуття киснем аналогічний нагріванню дуття. Але зменшення кількості газів на одиницю чавуну, на відміну від нагріву дуття, відбувається не внаслідок зменшення витрати коксу, а внаслідок зменшення виходу фурменого газу на 1кг вуглецю, який згорає. При цьому зменшується кількість тепла, яке вноситься газами в шахту печі. Мала кількість тепла в шахті створює напружений тепловий баланс у цій зоні. Зм'якшення цього явища можна досягти наступними засобами: 1) скороченням ендотермічних процесів (випарювання вологи, розкладання карбонатів і ін.); 2) збільшенням приходу тепла вдуванням у цю зону ГВГ.

Підвищення вмісту кисню в дутті збагачує газову фазу оксидом вуглецю, тому t_i повинно рости. З іншого боку, зниження температур в шахті і збільшення температур у горні збільшують t_d , тому в залежності від комбінації кисню в дутті з природним газом, вологою дуття та таке інше, t_i повинно зростати. Зниження кількості тепла, яке вноситься в доменну піч нагрітим дуттям, зменшується при збагаченні його киснем. Це перешкоджає зниженню витрат коксу, а іноді навіть і підвищує його.

Тепловіддача вуглецю визначається рівнянням, кДж/кг:

$$q_c = \omega_c + \frac{22,4}{24} \left(\frac{C_0 t_d - C_0 t_r}{\omega} - C_0 t_r \right)$$

З нього випливає, що q_c при збагаченні дуття киснем росте тільки у випадку $t_d < t_r$. Цього ніколи не буває, тому витрати коксу повинні зрости. Головною умовою зберігання витрат коксу на постійному рівні, або забезпечення його знижки, повинна бути незмінна величина температури колошникового газу. Це досягається тільки при плавці феросплавів.

Позитивним фактором збагачення дуття киснем є підвищення калорійності колошникового газу в зв'язку зі збільшенням концентрації CO і зниженням концентрації N_2 .

При збагаченні на рівні 60% O_2 можна одержати газ, який після конверсії CO по реакції $CO + H_2O = CO_2 + H_2$ і відмивання CO_2 має відношення $H_2/N_2=3,2$. Такий газ придатний для синтезу аміаку.

Аналіз розрахункових і практичних даних показує, що збагачення дуття киснем при $t_b=1000^\circ\text{C}$ зменшує:

- температуру колошникового газу, витрати дуття, вихід фурменого газу, концентрацію N_2 , час перебування газу і матеріалів у печі, собівартість чавуну;
- збільшує:
- теоретичну температуру горіння, частку прямого відновлення, сумарну кількість $(CO+CO_2)$, ступінь використання CO , добове

виробництво, витрати коксу та інтенсивність плавки.

не змінює:

- витрати коксу (за визначеними умовами), кількість вуглецю, який згоряє на фурмах, ступінь використання CO (за визначеними умовами).

Узагальнюючи вплив збагачення дуття киснем, можливо зробити наступні висновки:

- 1) підтримка теоретичної температури горіння на рівні не $< 2300^{\circ}\text{C}$ можлива при температурі дуття не вище 1100°C , а концентрація кисню не повинна перевищувати $(20 + \phi)$; для спецчавунів $t_{\text{г.г.}} = 2500\text{--}2700^{\circ}\text{C}$;
- 2) зростання добового виробництва становить 3 – 4,7% на 1% додаткового кисню в дутті при виплавці переробного чавуну та 5–7,5% для феросплавів;
- 3) відносна витрата коксу при збагаченні дуття киснем не знижується;
- 4) температура колошникового газу знижується у розрахунку на 1% додаткового кисню в межах від 10 до 32°C ;
- 5) ступінь непрямого відновлення не залежить від збагачення дуття киснем, якщо останнє не супроводжується зміною температури дуття, вологи дуття та витратою природного газу.

5.4 Вдування в горні заміників коксу

У 1838 р. В. Барнетом було запропоноване вдування смоли й вуглецьмістних газів, а в 1840 р. С. Бэнксом – вдування деревного вугілля, коксу, вугільного пилу. У 1840-45 р.р. у Франції вдували деревинно-вугільний дріб'язок і в результаті одержали 10% економії вугілля.

Л. Бэлл запропонував вдувати в доменні печі відновлювальні гази, а Д. Чернов – відновлювальні продукти згорання твердого палива.

На початку 20-го століття на Заході застосовували нафту для розігріву горна при похолоданнях і настоутвореннях, а у шведських електродомених печах повертали в горні колошниковий газ для охолодження горна і збільшення кількості відновлювальних газів.

У 20-х роках у Німеччині Е. Дипшлягом випробуване вдування пиловугільного палива, але результати були негативні – економії коксу не було.

У 1948 р. в Угорщині використовували відновлювальний газ зі змістом близько 73% ($\text{CO} + \text{H}_2$). При цьому ступінь непрямого відновлення зросла з 70% до 97%.

Наприкінці 50-х років вдування різних палив знайшло широке поширення в доменному виробництві.

5.4.1 Теорія питання вдування вуглеводнів в горні доменної печі

Вуглеводні згоряють і дають CO і H_2 . CO_2 і H_2O , що утворюються при цьому, реагують з вуглицем коксу (C_k), утворюючи також CO і H_2 . Теплота неповного згорання граничних вуглеводнів у розрахунку на 1 кг вуглецю, що згоряє, значно менше, ніж для вуглецю коксу, тому що частина тепла поглинається в процесі піролізу (розкладання вуглеводнів на вуглець і водень). Як видно з таблиці 5.4.1, теплота розкладання граничних вуглеводнів, а також рідких і твердих палив зростає зі зменшенням вагового відношення С:Н в них. Мінімальне значення вона досягає для метану, складаючи при цьому 30% від теплоти неповного згорання вуглецю коксу.

Таблиця 5.4.1 Теплота неповного згорання вуглецю різних палив (у залежності від відношення в них Н:С)

Паливо	Відношення Н:С	Теплота згорання	
		кДж/кг ³	%
Кокс	0,003	9800	100
Антрацит	0,003	9400	96
Газове вугілля	0,09	8400	85

Мазут	0,12	7500	77
Вуглеводні:			
Пентан (C ₅ H ₁₂)	0,20	6740	69
Етан (C ₂ H ₆)	0,25	5650	58
Метан (CH ₄)	0,333	2970	30

При вдуванні холодних палив вони нагріваються повільно, тому піроліз вуглеводнів починається при низьких температурах, при цьому утворюється полум'я, що коптить, і частина сажистого вуглецю згоряє не цілком. Крім того, сажистий вуглець розчиняється в продуктах плавки, погіршуючи дренаж через зріст їхньої в'язкості. При цьому утворюється гарнісаж у заплічках і распару, посилено горять фурми. Повному горінню вуглецю палива сприяє краще змішування палива з дуттям, а для рідкого палива – більше диспергіювання, висока температура дуття і збагачення дуття киснем. Зі збільшенням витрати палива збільшується кількість сажистого вуглецю, знижується кількість тепла і зменшується коефіцієнт заміни (Кз) паливом коксу.

Загальний прихід тепла від горіння коксу $[(9800 + V'_d \cdot t_0) \text{кДж/кг} \cdot C_\phi]$ зростає на величину $V_S \cdot (w_S + \bar{v}_d \cdot i_d) \text{кДж/кг} \cdot c_\phi$ при вдуванні холодного палива, де V_S - витрата палива, м³(кг)/кг·C_ф, w_S - теплотворна здатність палива, кДж/м³(кг), i_d - ентальпія дуття за винятком теплоти розкладання вологи дуття, кДж/м. Це одна з причин зниження витрати коксу.

Теоретична температура горіння знижується зі збільшенням витрати палива через переважне збільшення об'єму газів над кількістю внесеного тепла. Ступінь зниження теоретичної температури горіння залежить від виду палива: чим його теплотворність вище, тим менше знижується температура. Цим визначається гранична витрата палива.

Кількість колошникового газу зростає пропорційно обсягу фурменого

$$V'_{\text{кол}} = C_\phi \cdot V'_r + \frac{22,4}{12} C_d + C_r \cdot \bar{V}_r, \text{ м}^3$$

В міру росту витрати палива третій член суми зростає більше, ніж загальне зменшення перших двох. У результаті об'єм газу збільшується, а підвищення відносин водяних еквівалентів газу і матеріалів $(\frac{w_r}{w_m})$ приводить до росту температур у шахті і на колошнику, незважаючи на поліпшення теплопередачі газу за рахунок водню.

Збільшення в газі змісту (CO + H₂) на одиницю чавуну, часу перебування матеріалів і газів у печі, унаслідок зниження витрати коксу, знижує інтенсивність плавки. При цьому зростає ступінь використання відновлювальних газів ($\eta_{(CO+H_2)} = \eta_c$) і, як наслідок, підвищується ступінь непрямого відновлення (τ_1). Це особливо виявляється при вдуванні природного газу (підвищення $\Delta \tau_1 = 19,6\%$), для мазуту - 15,9% і ще менше для вугільного пилу - 8,7%, Коефіцієнт заміни (Кз) при цьому відповідно дорівнює 0,82; 1,20; 0,84 (1978р.).

При визначенні вище приведених параметрів накладається багато сторонніх факторів, тому в кожному випадку варто робити «Баланс факторів» з метою відслідкування чи компенсації (обліку) їхнього впливу на витрату коксу і продуктивність.

Економія коксу, обумовлена вдуванням додаткового палива, змінюється в широких межах. Вона характеризується коефіцієнтом заміни коксу, тобто заощадженням коксу, віднесеним до одиниці витраченого палива (кг/м³ чи кг/кг). Доцільно визначати вплив додаткового палива в чистому виді, уводячи виправлення на вплив супутньої зміни інших параметрів.

Коефіцієнти заміни можна визначати трьома способами:

$$1) \text{ Загальний: } Kz' = \frac{\Delta K'}{V_s} = \frac{(K'_0 - K'_2)}{V_s}, \text{ кг/м}^3 \cdot (\text{кг})$$

де K'_0 і K'_2 - витрата коксу базовий і при вдуванні палива в кількості V_s (кг/м³(кг)т)

2) Різницевий:
$$K_{з'} = \frac{(K'_1 - K'_2)}{(V_{S2} - V_{S1})}, \text{ кг/м}^3(\text{кг})$$

де K'_1 і K'_2 – витрати коксу відповідно при витратах палива V_{S1} і V_{S2} , кг/м³(кг)т

3) Диференціальний (похідний)
$$K''_{з} = \frac{dk}{dV_S}, \text{ при витраті палива, що вдувається, } V_S$$

Усі три $K_{з}$ збігаються при лінійному зниженні витрати коксу з ростом витрати палива, що вдувається. У більшості випадків зниження $K_{з}$ із ростом V_S сповільнюється, при цьому $K'_{з}$ і $K''_{з}$ сильно відрізняються від $K_{з}$.

Таблиця 5.4.2 Витрати коксу і коефіцієнти заміни при різних витратах палива.

V_T , м ³ /кг чавуни	0	0,01	0,05	0,10	0,15	0,20
K' , кг/кг чавуну	0,500	0,480	0,438	0,400	0,367	0,338
$K_{з}$, кг/м ³ (кг)т	-	2,00	1,23	1,00	0,89	0,81
$K''_{з}$, кг/м ³ (кг)т	-	1,40	0,86	0,70	0,62	0,57

На практиці при $V_S=100$ м³(кг)т чавуна і незмінних параметрах дуття одержують $K_{з}$ у таких межах:

ПГ – 0,9÷0,7; КГ – 0,5÷0,4; Мз-1,4÷1,2; ПВП (антрацити)-1,1÷1,0.

При тепловій компенсації, тобто при підвищенні температури дуття, $K_{з}$ підвищується.

При вдуванні додаткових палив, підвищується вихід горнових і колошникових газів, зростає активна вага шихти, але при цьому зменшується газопроникність шихти через зниження витрати коксу, що приводить до

зниження інтенсивності плавки. Тому вважається, що продуктивність доменної печі залишається постійною (у випадку застосування атмосферного дуття). При збагаченні дуття киснем до 30-40%, підвищенні температури дуття і збільшенні витрати природного газу, що приводить до зниження теоретичної температури горіння, продуктивність може бути підвищена до 15-35%.

Собівартість чавуну визначається витратою палива, що вдувається, на 1 т чавуну, коефіцієнтом заміни ним коксу, а також співвідношенням цін коксу і додаткового палива. В даний час стрімке зростання цін на усі види палива, обумовлене світовою енергетичною кризою, істотно понизило ефект їхнього використання.

5.4.2 Вдування природного газу

Вперше природний газ використали в 1957 р. на ДП-4 заводу ім. Петровського. У 1958-60 р. на “Запоріжсталі” і з-ді ім. Держинського застосували природний газ на дутті з 24% O₂. У 1977 р. вже 111 печей СРСР працювало з природним газом і 86 з них - на збагаченому дутті. Зараз усі печі працюють на комбінованому дутті. Загальна економія коксу склала більш 10 млн. т.

У США природний газ використовують з 1953 року, а в Західній Європі - з 1960 р. У деяких з них (Франція, Італія) використовується російський газ.

Природний газ містить 90-99% CH₄; 0,3-4,5% C₂H₆; 0,1-1,2% C₃H₈; 0,1-0,86% C₄H₁₀; до 0,3 C₃H₁₂; CO₂=0,1-1,0; N₂=0,5-3%. Кількість сумарного вуглецю і водню складає, м³/м³: (\bar{c})=0,98-1,08; (\bar{h})=1,95-2,07. Теплота неповного згоряння $\omega_s=1500-1800$ кДж/м³ (5% від тепла повного згоряння).

До доменної печі газ підводиться через кільцевий повітропровід, бічний отвір у фурмі зверху, щоб не заливало шлаком.

Розподіл газу по фурмах нерівномірний і складає 0-188% від середнього. На фурмах з високим відношенням газ/дуття $t_{газу}$ зменшується, що впливає на в'язкість шлаку і неповноту згоряння природного газу. Це приводить до прогару

фурм. Кількість газу по фурмах відрізняється до 1,5 разів, що вимагає автоматичного регулювання його витрати і співвідношення з дуттям. На заводі ім. Ілліча використовували таку систему регулювання, у результаті покращився хід печі і її техніко-економічні показники.

Горіння CH_4 природного газу завершується на відстані до 1,5 м від устя фурми, а H_2O зникає за межами 2,5 м, що на 1 м більше межі зникнення CO_2 .

Підвищення частки CO і H_2 у фурменому газі знижує ступінь окислювання елементів чавуну більш ніж у 2 рази.

У шахті максимальний зміст $\text{H}_{2\text{max}}$ спостерігається на периферії, $\text{H}_{2\text{min}}$ – біля осі, але проте біля осі зміст H_2 у 3-4 рази більше, ніж без вдування природного газу.

Краще змішування природного газу з дуттям у зоні циркуляції підвищує частку повітря в проміжній зоні і його відновлювальну здатність. Зі збільшенням витрати газу зміст H_2 у колошниковому газі зростає пропорційно (рис. 5.4.1).

З приведеного малюнку видно, що збільшення витрати газу до $100 \text{ м}^3/\text{т ч.}$ збільшує загальний обсяг газу за рахунок водню, підвищує ступінь його використання і всього газу в цілому; при цьому знижується ступінь прямого відновлення з 49% до 34%. За рахунок збільшення об'єму газу зростає температура колошникового газу з 250° до 340° С. Співвідношення ступенів використання H_2 і CO зростає з 0,5 до 1,0.

Результати впровадження природного газу дають різний характер зміни R_d з ростом витрати газу, але більшість даних дають пряму залежність:

$$r_d = \frac{51,2}{V_G} - 0,216$$

Відповідно до цього рівняння при витратах газу $160 \text{ м}^3/\text{кг}$ ступінь прямого відновлення заліза дорівнює приблизно 10%.

Вдування природного газу на різних заводах супроводжувалося збільшенням температури дуття та змісту кисню в дутті, зниженням вологості, тому

одержували значення K_z від 0,8 до 2,0 $\text{кг}/\text{м}^3$. Збільшення продуктивності було значно меншим і складало 1-4%.

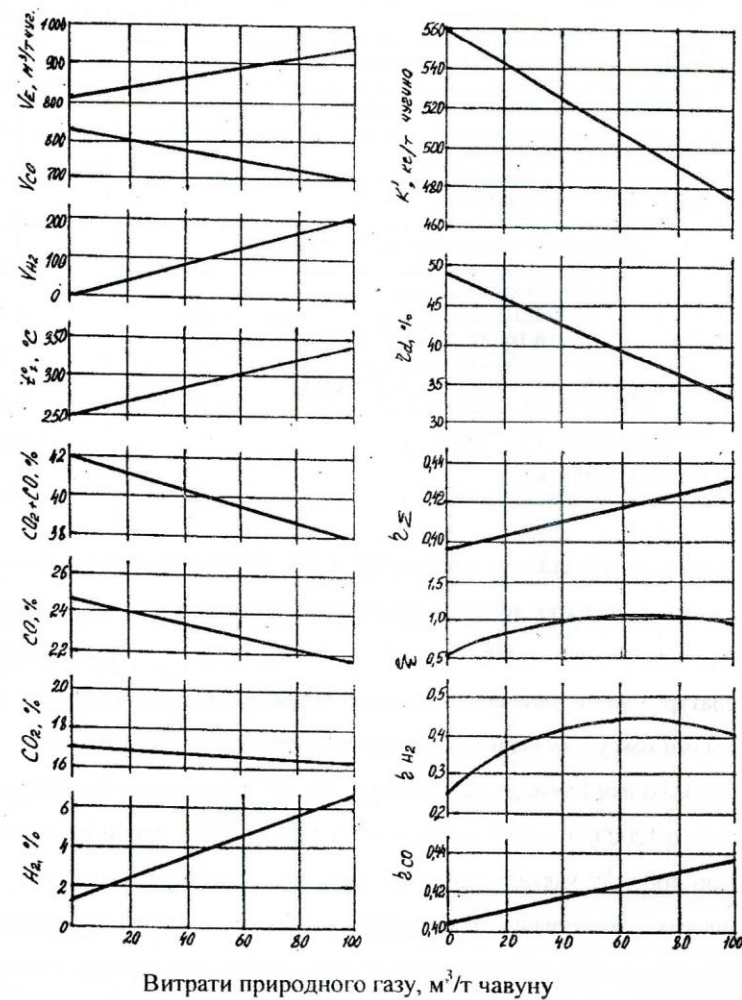


Рисунок 5.4.1 Показники доменної плавки при вдуванні природного газу

Останнім часом використовують комбіноване дуття: сполучення збагачення дуття киснем із вдуванням природного газу. Комбіноване дуття припускає використання протилежного впливу кожного параметра на показники плавки (Таблиця 5.4.3).

Таблиця 5.4.3 Напрямок змін показників плавки при вдуванні природного газу і збагачення дуття киснем.

Показники	Природний газ	кисень
1. Теоретична температура горіння, °С	-	+
2. Температура колошникового газу, °С	+	-
3. Ентальпія дуття, кДж/кг·С _ф	+	-
4. Зміст (СО + Н ₂) у пічному газі, %	+	+
5. Час перебування шихти при ΔРзаг.=const, ч	+	-
6. Ступінь прямого відновлення, %	-	±
7. Зовнішні втрати тепла, кДж/кг чавуну	+	-
8. Вихід колошникового газу, м ³ /т чавуну	+	-
9. Витрата коксу кг/т чавуну	-	±
10.Продуктивність	±	+

У такий спосіб спільне використання цих інтенсифікаторів навіть при їх дуже великих витратах дозволяє утримувати параметри процесу в нормальних межах: підвищення змісту кисню в дутті при постійній теоретичній температурі горіння дозволяє підвищити витрати природного газу, що приведе до економії коксу, хоча сам по собі кисень цього зробити не дозволяє.

Розрахунки Рамма А. Н.[6] показують, що збільшення температури дуття від 700 до 1200°С і вмісту кисню в дутті з 21 до 30% (при зміні витрати газу від 0 до 400 м³/т чавуна) майже не змінюють ступінь прямого відновлення, підвищують теоретичну температуру горіння, зменшують температуру колошникового газу. Відносна витрата коксу нижче при менших температурах дуття і великих витратах газу (більш 200 м³/т).

Витрати газу більш 200 м³/т чавуну дають погіршення газодинаміки доменних печей. Це особливо впливає на рівність ходу у випадку роботи на тугоплавких шлаках.

Оптимальне співвідношення витрат природного газу і технологічного кисню (V_G/O_{2д}) обумовлено межею величини теоретичної температури горіння, рівному 1900-2300°С. Робота на мінімальній теоретичній температурі дозволяє вдувати більше газу і знижує витрату коксу. Робота на максимальній теоретичній температурі горіння дозволяє більше збагачувати дуття киснем і одержувати приріст виробництва.

З підвищенням витрати газу і збільшенням змісту кисню в дутті прихід тепла в області горіння зменшується, а в області відновлення - зростає за рахунок відновлення воднем. Балансовий прихід тепла зменшується в результаті скорочення втрат тепла з газом і в зовнішнє середовище, а також за рахунок зменшення корисної витрати тепла. Це не позначається на абсолютній величині витрати коксу. Істотний вплив має температура дуття: при атмосферному дутті її підвищення приводить до підвищення Кз, а при збагаченні дуття киснем до 35% підвищення температури дуття знижує Кз.

Підігрів газу до 500-600°С, коли піроліз відсутній, дозволяє одержати економію коксу до 10 кг/т чавуну. Його можна гріти і до 800°С при введенні мікродоз кисню для запобігання виділення сажистого вуглецю. У цьому випадку економія коксу зростає.

5.4.3 Вдування коксового газу

Промислові досвіди по вдуванню коксового газу (КГ) уперше були проведені в 1957 році на КМК , а потім відновлені в 1962 році, з витратою газу до 90 м³/т чавуна. У США вперше коксовий газ був застосований у 1960 році на заводі в Невил Айленді. Метод випробуваний на багатьох заводах СРСР, але зараз практично не використовується. В невеликих обсягах застосовується у США, Канаді, Англії, Франції.

КГ є продуктом коксування, очищеним від смол, бензолів, сірководню, аміаку.

Зразковий склад коксового газу: $H_2=55-60\%$; $CH_4=22-28\%$; $C=5-7\%$; $C_mH_n=2-3\%$; $CO=2-3\%$; $N_2=2-4\%$; $O_2=0-1\%$; $H_2O=2-3\%$.

Сумарна концентрація компонентів, m^3/m^3 : $(\bar{C})=0,37-0,45$; $(\bar{H})=1,05-1,25$; $(\bar{O})=0,05-0,08$; $(\bar{N})=0,02-0,04$.

Теплота неповного згоряння КГ складає $80-180 \text{ кДж}/m^3$, тобто в 10-20 разів менше природного газу. Повна теплота згоряння коксового газу усього в 2 рази менше, ніж у природного. Витрата кисню на спалювання $1 m^3$ коксового газу не перевищує $0,5-0,6 m^3$, а кількість внесеного їм тепла – до $1000 \text{ кДж}/m^3$ при $O_{2n}=21\%$. Тепловіддача коксового газу складає $\leq 400 \text{ кДж}/m^3$, у той час як для природного газу вона міняється звичайно в межах $2500-3800 \text{ кДж}/m^3$.

До недоліків коксового газу варто також віднести наступне:

- необхідність комприміювання його перед подачею в піч до тиску, що перевищує тиск дуття в доменній печі;
- необхідність очищення його перед комприміюванням від нафталіну, H_2S ; C_xH_y , неграничних з'єднань і ін., що забруднюють компресори.

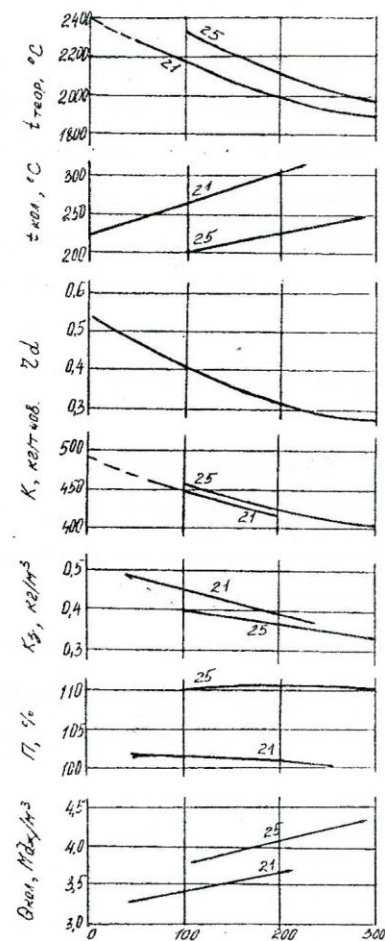
Вихід газу звичайно становить приблизно $450 m^3/t$ коксу, тому якби весь газ вдувався в печі, то його кількість склала б: $0,5 t/t \text{ чавуну} \cdot 450 = 225 m^3/t$ чавуна, що еквівалентно $\approx 100 m^3/t$ чавуну.

Досвід вдування на Заході, США і Японії показали високу ефективність використання коксового газу: $1 m^3$ КГ дає економію коксу рівнозначну $0,8 m^3$ природного газу, тобто $K_z \approx 0,6$, що вважається завищеним при зниженні продуктивності на 7-11%.

На КМК у 1963 році отримано $K_z=0,63 \text{ кг}/m^3$ КГ і підвищення продуктивності 4,2%. На заводі «Запоріжсталь» у 1965 році при вдуванні КГ одержали $K_z=0,49 \text{ кг}/m^3$ газу при зростанні продуктивності на 3,4%.

Вплив витрат коксового газу при атмосферному ($21\% O_2$) і збагаченому до

$25\% O_2$ дуття показано на рис.5.4.2.



Витрати коксового газу, m^3/t чавуну

Рисунок 5.4.2 Показники доменної плавки при вдуванні коксового газу

Видно, що при збільшенні витрати газу від 150 до 250 м³/т чавуна теоретична температура зменшилася на 182°C при атмосферному дутті і на 220°C при збагаченому; температура колошникового газу зросла відповідно на 37 і 30°C; частка прямого відновлення знизилася на 8,1 і 8,3%; витрата коксу знизилась на 26 і 30 кг/т чавуну; коефіцієнт заміни з 0,41 до 0,35 і з 0,38 до 0,34 кг/м³ газу.

Прихід і витрата тепла збільшуються незначно. Це додаткове тепло майже цілком виноситься колошниковим газом. Збагачення дуття сильно зменшує цю статтю теплового балансу, але вона стає більше частки зміни сумарної витрати тепла на величину зменшення зовнішніх витрат тепла.

Зростання виробництва складе 2,3-2,5% на кожен відсоток O₂ у дутті. Для нинішнього стану цін на газу більш вигідно використовувати природний газ, але його вигода невелика. Тому під час зимових перебоїв з постачанням природного газу вигідно використовувати коксовий.

5.4.4 Вдування мазуту

Мазут вперше випробуваний у Франції в 1950 р: вдування мазуту в кількості 80 кг/т чавуну зменшило витрати коксу на 130 кг/т чавуну. У 1970 році 85% усіх печей Франції працювали на мазуті.

У СРСР перші досвіди використання мазуту проведені в 1957 р. на ММК. З 1972 р. під час перебоїв з постачанням природного газу на заводах Півдня використовували мазут. Склад мазуту з різних джерел приведений у таблиці 5.4.4.

Таблиця 5.4.4 Склад мазуту з різних джерел

Джерело	Склад, %				
	C	H	O + N	S	зола
1. Сира нафта	84-85	12-14	0,5-1,7	0,03-4,3	<0,3
2. Мазут малосірчаний	86-88	10-12	0,6-1,0	0,4-0,7	<0,5
3. Кам'яновугільна смола	89-93	5-9	0,5-1,0	0,4-1,7	н.д.

Мазут здатний утворювати водяні емульсії до 10% H₂O. Для зниження в'язкості його потрібно нагрівати до 80-225°C. Повнота згоряння мазуту залежить від ступеня розпилення до <40 мкм, тому застосовуються форсунки з уведенням через сопла і фурми.

Практичні значення K_з отримані від 0,7 до 1,7, теоретичні від 1,29 до 1,45. Витрата коксу знижується ≈ на 150 кг при вдуванні 100 кг/т чавуну мазуту; τ_d – на 12%; t – на 200°C; C_ф на 100 кг; J_к на 25%; собівартість чавуну на 3,5%; П_{доб} росте на 4,5%.

5.4.5 Вдування пиловугільного палива

Перевага використання пиловугільного палива (ПВП) в виробництві чавуна підтверджується наступними даними:

- за останні 20 років ПВП засвоєно в доменних цехах більш ніж 25 розвинутих країн світу;
- промислове використання пиловугільної технології та відповідне зменшення обсягу виробництва коксу визначають зниження капітальних та експлуатаційних витрат, підвищення виробництва праці, зниження забруднення водного та повітряного басейнів шкідливими виносимами
- витрати ПВП на 1 т чавуна досягли 170-290 кг, частка заміни ім коксу – 35-50%.

Для виробництва ПВП використовують вугілля, що не коксується. За вітчизняним та зарубіжним досвідом для виготовлення ПВП рекомендуються вугілля з такими характеристиками: вміст золи – 10-12%; сірки – 1,5-2,0%; крупність – до 50-80 мм. Це вугілля марок Т (Тощий), А (Антрацит), Г (Газовий), запас яких в Україні в цілому дорівнює 3,6-4,8 млрд. т.

Повне згоряння часток можна забезпечити при помелі вугілля до розміру <0,1 мм і підтримки t_d>1000°C.

Технологія (ПВП+ПГ+O₂) дає можливість значного зниження частки коксу в доменній шихті, що визначає необхідність реалізації таких компенсуючих засобів: підвищення температури дуття до 1100-1300°C; зменшення вмісту дрібної фракції в агломераті до 1-5%; збагачення залізородної частини

шихти та зниження основності шлаку до 1,0-1,15 з метою оптимізації фізичних якостей шлаків та зниження його кількості до 200-300 кг/т чавуна, обмеження надходження в піч сірки до 2-4 кг/т чавуна та ін.

Для оцінки ефективності вдування ПВП скористуємося технологічними розрахунками А.Н.Рамма [6], в яких температура та вологість дуття прийняті для всіх розрахункових режимів однаковими ($T_d=1250\text{ }^\circ\text{C}$; $d=1\%$).

Зміна розрахункових показників доменної плавки при вдуванні пиловидного палива наведена на рис. 5.4.3.

Вплив використання антрацити та газового вугілля на зміну основних показників доменної плавки наведено в табл. 5.4.5.

Таблиця 5.4.5 – Зміна основних показників доменної плавки при вдуванні ПВП до 150 кг/т чавуна

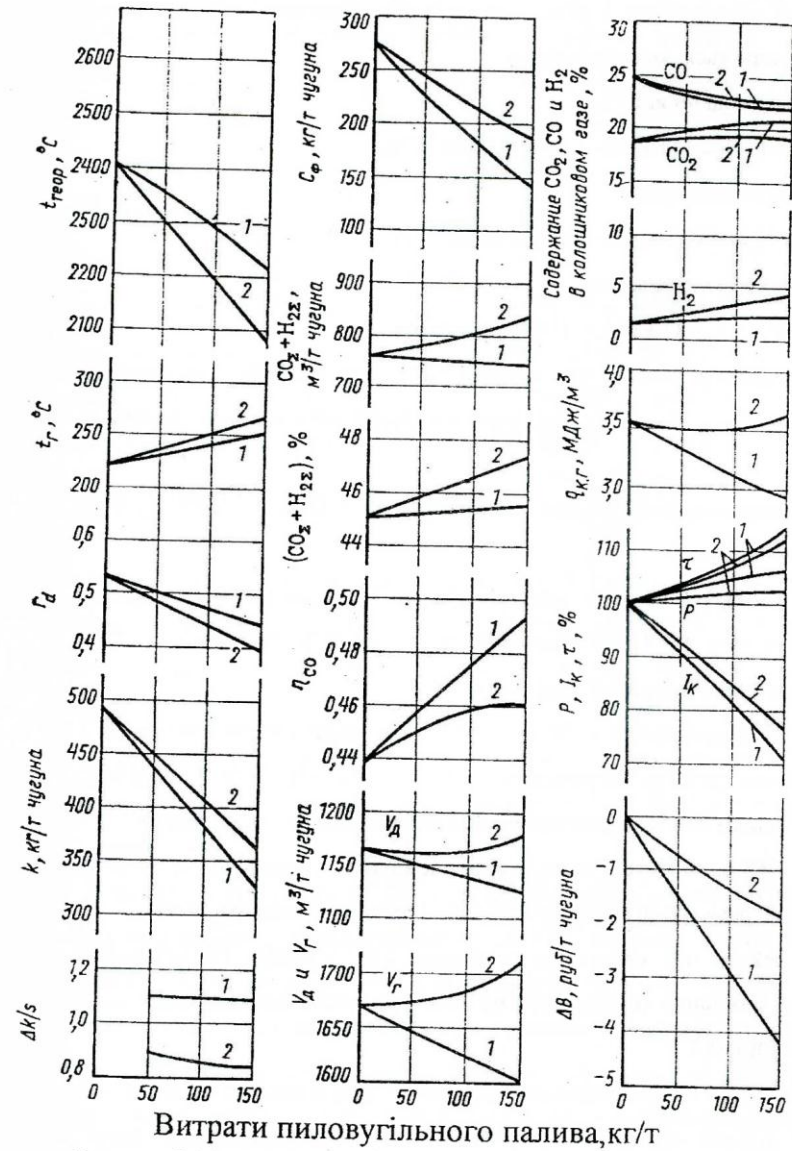
Показники	Антрацит	Газове вугілля
Теоретична температура згоряння, $^\circ\text{C}/\text{кг ПВП}$	- 1,3	- 2,2
Ступінь прямого поновлення, $\%/\text{кг ПВП}$	- 0,06	- 0,09
Температура колошникового газу, $^\circ\text{C}/\text{кг ПВП}$	+ 0,17	+ 0,29
Коефіцієнт заміни коксу, кг коксу/кг ПВП	1,1	0,8 – 0,9
Виробництво доменної печі, $\%$	4,4	2,2

Досвід ВАТ “ДМЗ” свідчить, що в сучасних технологічних умовах доменних цехів України можливо ефективно вдування в горні печі 120 – 140 кг ПВП на 1 т чавуна, що дає знижку витрати коксу на 185 кг, а ПГ – на 34 $\text{м}^3/\text{т}$ чавуна.

5.4.6 Вдування гарячих відновлювальних газів (ГВГ)

Головною вимогою до ГВГ є мінімальний вміст окислювачів (CO_2 і H_2O) та метану і максимальна його температура. Температура повинна бути високою, але не перевищувати рівня, небезпечного для стійкості газового тракту.

вдування 1000-1100 $^\circ\text{C}$ не реагують з вуглицем коксу.

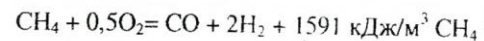


Витрати пиловугільного палива, кг/т
Рисунок 5.4.3 Розрахункові показники доменної плавки при вдуванні пиловидного палива: 1 — антрацит; 2 — газове вугілля

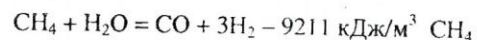
Одержання ГВГ

Найбільш поширеними способами отримання ГВГ є способи окисної конверсії газоподібних і рідких вуглеводнів. Залежно від окислювача, який використовується, конверсія буває:

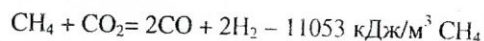
1) повітряна чи киснева:



2) парова конверсія:



3) вуглекисла конверсія:



У реальних умовах у газі залишається деяка кількість окислювачів CO_2 і H_2O , CH_4 , $\text{C}_{\text{саж}}$, N_2 . Використання нікелевих каталізаторів знижують їхню кількість.

Вперше запропонували вдування в доменну піч ГВГ (з $t_f=1400^\circ\text{C}$) у 1952 р. Ж. Рейк і Дж. Брассет.

У 1970 р. на з-ді «Запоріжсталь» у газогорелочній шахтній печі інститутом газу АН СРСР одержали газ з 3,3% CO_2 , 11% H_2O і 7,72 сажі/м³ методом кисневої конверсії при $t=1200^\circ\text{C}$.

Я. Карпиловським у 1971 р. запропонований спосіб одержання ГВГ із мінімальним змістом окислювачів: 2% CO_2 і 1% H_2O з $t=1200^\circ\text{C}$, а з використанням Ni - каталізатора можна мати ще менше окислювачів.

В 1968 р. на Новотульському заводі вдування в горн 941 м³ газу/т чавуну знизило витрату коксу на 110 кг/т чавуну і продуктивність на 17,8%.

У цей же час американці вдуванням ГВГ у шахту 190 м³ газу/т чавуну одержали зростання виробництва на 40% і зниження витрати коксу на 26,7%, при цьому $K_3=0,3$.

У Бельгії (Угрэ) одержали аналогічні результати на менших витратах ГВГ. У Японії відбирали природний газ і використовували його задля вуглекислої конверсії коксового газу. Одержали коефіцієнт заміни коксу

$K_3=0,23$ кг/м³ ГВГ при вдуванні в шахту печі при 4-8% N_2 .

Теоретичні розрахунки Рама [6] заміни природного газу на ГВГ паровою конверсією, при вдуванні останнього в горн, приведені в табл.5.4.6.

Таблиця 5.4.6 Показники плавки при заміні природного газу на ГВГ

Показники	Зміст O_2 у дутті, %		
	21	30	40
Видатковий природний газ/ГВГ, м ³ /т чавуну	125/500	175/700	225/900
Теоретична температура горіння, °C	1876/1964	1870/1920	1818/1796
Ступінь прямого відновлення, °C	29,8/21,9	23,6/15,4	18,8/10,8
Температура колошникового газу, °C	305/350	199/235	141/172
Витрата коксу, кг/т чавуну	376/351	351/309	333/272
Продуктивність, %	100,6/111,4	120/137,3	133,3/154,5

Видно, що зі збільшенням витрат газу і кисню в дутті теоретична температура при вдуванні ГВГ вище, за винятком випадку з $\text{O}_2=40\%$, ступінь прямого відновлення знижується в середньому на 8% і при 40% O_2 у дутті її абсолютна величина складає 10,8%.

Температура колошникового газу зростає, за рахунок чого незначно збільшується витрата тепла, хоча з ростом вмісту O_2 у дутті в цілому витрата тепла знижується.

Порівняння ефективності ГВГ, отриманих різними способами показує, що найбільший коефіцієнт заміни отриманий для ГВГ плазмової конверсії – 0,773, для парової – 0,232, кисневої – 0,229, вуглекислої – 0,181, повітряної – 0,154.

Виконано розрахунки так само для вдування частини природного газу в горн, а частини у виді ГВГ у шахту. Зроблено висновок, що більше 500 м³/т чавуну в шахту вдувати не рекомендується через збереження перепаду тиску газу. Це можна робити лише ціною зниження інтенсивності плавки і продуктивності печі.

5.5. Підвищений тиск газів доменної печі

Підвищення тиску газів у доменній печі є одним з методів інтенсифікації доменного процесу, що дозволяє підвищити продуктивність печі і знизити витрати коксу.

Вперше думка про доцільність штучного підвищення тиску газів у доменній печі висловив Г. Бессемер у 1871 році. У 1938 році патент на застосування підвищеного тиску газів у доменних печах був отриманий Дж. Эвери (США). У СРСР перші досвіди роботи з підвищеним тиском були початі з ініціативи И.И. Коробова на заводі ім. Петровського в 1940 році. У 1977 році в СРСР із підвищеним тиском уже працювало 117 доменних печей із загального числа 136. Надалі усі великі доменні печі передбачалося експлуатувати з можливістю підвищення надлишкового тиску до 250 кПа.

Вплив тиску на інтенсивність плавки і продуктивність

Найважливішим результатом підвищення тиску газів у доменній печі є виникнення можливості збільшення інтенсивності плавки.

Підвищення тиску газів у доменній печі надає можливість збільшити інтенсивність плавки.

Підвищення тиску газу в робочому просторі печі досягається введенням додаткового опору на шляху руху газу на виході з доменної печі. Унаслідок підвищення підпору газів перед додатковим опором зростає тиск газів не тільки на колошнику, але і у всьому обсязі печі, таким чином, підвищується тиск дуття, що розвивається повітродувкою.

Підвищення тиску газу біля фурм без зміни масової кількості дуття з $P_{1ф}$ до $P_{2ф}$ зменшує його об'єм пропорційно відношенню $P_{2ф} : P_{1ф}$, відповідно до цього знижується швидкість газу і перепад тиску газів між горном і колошником

$$(\Delta P_{Г-К}).$$

Загальний, «верхній» і «нижній» перепади тисків складають:

$$\Delta P = P_{ф} - P_{К}; \quad \Delta P_{В} = P_{Р} - P_{К}; \quad \Delta P_{Н} = P_{ф} - P_{Р};$$

де $P_{ф}$, $P_{К}$, $P_{Р}$ – тиск на фурмах, на колошнику й у розпарі відповідно.

Щоб зберегти первісний перепад тисків можна відповідно підвищити масову швидкість газу, тобто підвищити інтенсивність плавки. Підвищення інтенсивності плавки пропорційно підвищенню масової швидкості шляхом збільшення масової кількості дуття до досягнення критичного перепаду тисків, при якому вже починається порушення рівного ходу печі.

Таким чином, підвищений тиск газів впливає на газодинаміку доменного процесу, що визначає продуктивність доменних печей.

Ріст продуктивності доменних печей при підвищенні тиску на колошнику трохи перевищує збільшення інтенсивності плавки в результаті одночасного невеликого зниження відносної витрати коксу:

$$P = I_{К} / K$$

Згідно даним приведеним у роботі [7] ріст продуктивності оцінюється в $1,1 \pm 0,2$ % на кожні 10 кПа підвищення надлишкового тиску на колошнику понад 100 кПа.

Ступінь підвищення тиску газів у робочому просторі оцінюється величиною тиску газів на колошнику.

Вплив тиску на витрату коксу

При підвищенні тиску газу в печі, на думку Дж. Эвери, прискорюються процеси непрямого відновлення в шахті, у результаті чого скорочується розвиток прямого відновлення за рахунок зменшення кількості CO_2 , що утвориться в гарячих зонах печі.

Іншим джерелом економії коксу є підвищення температури дуття, що можливо без порушення рівного ходу в результаті зменшення протитиску газів при підвищенні їхнього тиску в печі.

По галузевим даним [8] економія коксу від підвищення надлишку тиску газу на колошнику 100 кПа оцінюється в $0,5 \pm 0,2$ % на кожні 10 кПа підвищення тиску.

Вплив тиску на винос пилу.

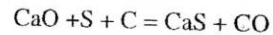
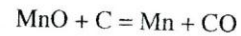
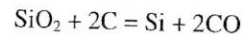
З підвищенням тиску газу на колошнику сильно зменшується винос

колошникового пилю – на 20-50 %, у деяких випадках на 75 %.

Скорочення виносу пилю при підвищенні тиску пояснюється зниженням швидкості газу над поверхнею шихти і його піднімальної сили, у результаті чого зменшується розмір часток, що захоплюються газом у газовідводи. Частки більшого розміру не можуть бути захоплені потоком газу й осідають на поверхні шихти. Згідно [6] максимальний розмір часток, що виносяться, зменшується зворотно пропорційно абсолютному тиску газу в ступені 0,6. При підвищенні надлишкового тиску на колошнику від 10 до 250 кПа максимальний діаметр їх зменшується в $(350/110)^{0,6} \approx 2$ рази, а вага у 8 разів.

Вплив тиску на склад чавуну

Підвищення тиску в доменній печі несприятливого позначається на ході реакцій, що супроводжуються збільшенням обсягу газової фази, зміщуючи їхню рівновагу вліво:



Найбільш істотно це впливає на реакції відновлення кремнію – середнє зниження вмісту кремнію в чавуні на кожні 10 кПа підвищення тиску складає 0,036 %.

Вплив тиску газу на відновлення марганцю є більш слабким. Крім цього, було виявлено значне збільшення вмісту вуглецю в чавуні, що визвано посиленням насиченням губчатого заліза сажистим вуглецем, кількість якого при підвищенні тиску газів різко зростає. Зниження вмісту кремнію в чавуні при збільшенні тиску повинно супроводжуватися підвищенням його температури, тому що заощаджене при меншому відновленні кремнію тепло передається рідким і газоподібним продуктам плавки (підвищення температури чавуну при збільшенні тиску дугтя в 1,5 рази повинне скласти для різних видів чавуну 32-40 °С).

6. Критерії оцінки ходу відновлювального процесу в доменній печі.

6.1 Класифікація критеріїв і їхнього співвідношення

Доменний процес по суті своїй є процесом відновлювальним. Для характеристики досконалості ходу відновлювального процесу використовуються критерії, що підрозділяються на три групи:

- 1) показники відносного розвитку прямого відновлення: ступінь прямого відновлення заліза по М. А. Павлову (r_d) – частка окисленого заліза, відновлювана з FeO прямим шляхом; частка всього кисню відновлюваних окислів, що переходить у газ у виді окису вуглецю (R_d); частка усього газифікованого кисню шихти, що переходить у газ у виді CO (\bar{R}_d). Відповідні показники непрямого відновлення визначаються вирахуванням з одиниці: $r_i = 1 - r_d$; $R_i = 1 - R_d$; $\bar{R}_i = 1 - \bar{R}_d$;
- 2) показники, що характеризують повноту окислювання вуглецю в доменній печі: відношення CO_2/CO у колошниковому газі (m); ступінь використання окису вуглецю (η_{CO}); ступінь використання теплової енергії вуглецю (η_c); «теплове значення» газифікованого вуглецю коксу (Q_c , кДж/кг);
- 3) показники, що характеризують відносну участь кисню дугтя і кисню відновлюваних окислів в окислюванні вуглецю коксу до CO: частка газифікованого вуглецю коксу, що згоряє на фурмах ($\chi = C_d/\text{CO}$), і частка його, що витрачається на пряме відновлення ($\rho = C_d/C_o$).

Критерії першої групи зв'язані між собою наступними співвідношеннями:

$$R_d = r_d O_{II}/O_R + O_{III}/O_R;$$

$$R_d = \bar{R}_d (1 + O_{IV}/O_R) - 0,5 O_{IV}/O_R$$

У межах кожної з двох останніх груп усі вище названі критерії рівнозначні і зв'язані наступними співвідношеннями:

$$\eta_{\text{CO}} = m/(1+m);$$