

ДЕРЖАВНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

На правах рукопису

Товаровська Гретта Йосипівна

ВИБІР ПАРАМЕТРІВ ГАРЯЧИХ ВІДНОВНИХ ГАЗІВ ДЛЯ
ВДУВАННЯ У ДОМЕННУ ПІЧ І РЕЖИМУ ГАЗИФІКАЦІЇ
ВУГІЛЛЯ ДЛЯ ЇХ ОДЕРЖАННЯ

05.14.04 - Промислова теплоенергетика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
дисертації на пошукування вченого ступеня
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ-1994

АВ 30.38

Робота виконана на кафедрі промислової теплоенергетики Державної металургійної академії України.

ЛНБ України ім. В. Стефаника
00777517 (Y)

Науковий керівник - кандидат технічних наук,
доцент В. В. Потапов

Офіційні опоненти - доктор технічних наук,
професор Левченко Б. А.

кандидат технічних наук,
доцент В. І. Шахова

Ведуча організація - завод ім. Петровського

Захист дисертації відбудеться "28" люня 1994 р.
о 12³⁰ годині на засіданні спеціалізованої ради К 068. 02. 01
при Державній металургійній академії за адресою:
320635, м. Дніпропетровськ, пр. Гагаріна, 4.

З дисертацією можливо ознайомитися у бібліотеці Державної металургійної академії України.

Автореферат разіслано "24" маг 1994 р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради,
кандидат технічних наук,
доцент

Ю. С. Паніотов

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність. Дефіцит коксуючого вугілля а також великі матеріальні і трудові витрати на виробництво коксу при екологічній небезпечності цього виробництва поставили задачу заміни його іншими енергоносіями як найважливішу для чорної металургії. Обмежені ресурси природного газу і мазуту в Україні при недостатлі низьковольтного вугілля для прямого вдування у фурми доменних печей, а також технологічні обмеження можливостей вдування великої кількості сировинних замінювачів коксу потребує кардинальної зміни підходу до вибору і підготовки до вдування додаткових палив.

Один з перспективних напрямів заміни коксу - це припічна газифікація низькосортного вугілля з вдуванням тарачих відновних газів (ГВГ) - продуктів газифікації вугілля (ПГУ) у доменні печі.

Мета роботи. Формування раціональних режимів газифікації вугілля і відповідних параметрів ГВГ для заміни частини коксу у доменній плавці при мінімальних витратах енергоресурсів.

Наукова новина. З позицій теплотехнічного принципу класифікації і вимог доменного виробництва до параметрів ГВГ визначені підходи до вибору засобів і пристроїв газифікації вугілля для одержання ПГУ, вдуваних у доменну піч (ДП).

На засаді чисельного аналізу умов одержання цільового газу встановлені межі змінювання параметрів, забезпечуючі найкраще значення критеріїв якості процесу газифікації.

Вперше вирішена задача встановлення параметрів процесу газифікації вугілля і відповідних параметрів ГВГ для вдування у ДП по критерію мінімальної витрати енергоресурсів. Встановлена доцільність збагачення дуття газифікатора киснем до 35-45% без його підігріву при допустимій з умов тракту подачі температурі ГВГ

до 1500 С і необхідність нагріву дуття до 1000-1500 С при меншому ступені його збагачення киснем у випадку допустимої температури ГВГ 1700-1900° С. Показана доцільність газифікації вугілля з коефіцієнтом надлишку окислювача 0,4 моль/моль.

Запропоновано новий принцип секціонування одиничних газифікаторів і розроблені технічні рішення на різних винаходів для його реалізації з метою одержання потрібної продуктивності багатосекційного газифікатора по газу при заданій його якості.

Практична цінність та реалізація результатів роботи. Розроблена методика комплексної оцінки витрат енергоресурсів в системі доменна піч - газифікатор вугілля, що дозволяє вирішувати практичні задачі вибору режимів роботи газифікатора в залежності від потреби доменного процесу.

Розроблені конструкції багатосекційних газифікаторів вугілля для ДП з використанням зупинених повітрянагрівачів.

Результати роботи передані інституту чорної металургії АН України для використання у розробках по приміненню продуктів газифікації вугілля у ДП.

На захист виносяться :

1. Обґрунтування вибору засобів і пристроїв газифікації вугілля для вдування продуктів газифікації в ДП.

2. Методика комплексної оцінки витрат енергоресурсів у системі доменна піч - газифікатор вугілля і вирішення задачі встановлення параметрів процесу газифікації і відповідних параметрів ГВГ для вдування в ДП по критерію мінімуму енерговитрат.

3. Одержані в решті рішення вказаної задачі значення параметрів процесу газифікації вугілля, складу і температури ГВГ, що подається до ДП.

4. Принцип секціонування одиничних газифікаторів та нові технічні рішення по його реалізації з метою одержання потрібної продуктивності багатосекційного газифікатора при заданому складі і температурі ГВГ.

Апробація роботи. Основні результати доповідались на 1 науково-технічній конференції, 2 симпозіумах и 1 науково-технічному семінарі.

Друківання. Основні положення дисертації викладені у 9 друкованих роботах, у тому числі в 1 брошурі, журналах "Сталь", "Металлур-

гическая и горнорудная промышленность" і 1 авторському свідотстві на винахід.

Об'єм та структура роботи. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, бібліографічного списку з 99 джерел і додатків; містить 153 сторінки машинодрукарського тексту, 42 малюнка і 5 таблиць.

ЗМІСТ РОБОТИ

Обмеженість ресурсів природного газу і мазуту і дефіцит усіх видів палива висуває на перший план використання для заміни коксу в доменній плавці низькосортного вугілля. Для рішення проблеми його вдування у ДП потрібно розвинути технологію газифікації вугілля за межами ДП и подачі продуктів газифікації в фурмені вогнища ДП. Рішення цієї проблеми містить встановлення раціональних параметрів ГВГ, вибір відповідних режимів газифікації вугілля і розробки технічних рішень по реалізації нової технології.

АНАЛІЗ ЗАСОБІВ ГАЗИФІКАЦІЇ ВУГІЛЛЯ І ВІДПОВІДНОСТІ ПРОДУКТІВ ГАЗИФІКАЦІЇ ВИМОГАМ ДОМЕННОГО ВИРОБНИЦТВА

На засаді розглядання засобів газифікації вугілля виконана їх класифікація за теплотехнічним принципом організації процесу: густий фільтруючий шар, киячий шар, зважений струм, газифікація у рідкій ванні, комбіновані процеси - сполучення окремих засобів.

Найважливіші чинники порівняльної оцінки засобів газифікації це сортамент використаного вугілля і якість цільового газу.

Засоби газифікації у густому фільтруючому шарі ґрунтуються на використанні кускового вугілля з заданим гранулометричним складом і міцністю при нагріванні. З цих позицій у процесах з "киплячим

шаром" до палива ставляться не такі жорсткі вимоги, але виникають проблеми вибору складу золи, що забезпечує її розм'ягчення і плавлення при можливо більш високих температурах. При газифікації у струмі, конкретно у апаратах циклонного та вихрового т.пу, а також у рідкому розплаві вимоги до якості палива мінімальні, можлива газифікація будь-якого вугілля при різноманітних режимах.

У густому фільтруючому шарі може бути отриманий газ з високою температурою і низьким вмістом окислювачів тільки в разі роботи з рідким золовипаленням при розвитку у зоні газифікації температур 1600-1900°C, перевищуючих температури плавлення золи. Однак температурний рівень процесу все ж обмежений використанням кускового вугілля і необхідністю збереження його міцності при пересуванні до зони газифікації. У найбільш досконалих газогенераторах з густим шаром температура вихідного газу становить до 1000°C при вмісті диоксиду вуглецю 3-5%.

При газифікації у "кип'ячому шарі" температура процесу обмежена до 900-1000°C при вмісті CO у газі 10-20%.

Газифікація у вихровому струмі дозволяє вести процес при будь-яких температурах, наприклад при 1500-2000°C, що при надлишку вуглецю в умовах термодинамічної рівноваги дає незначний вміст окислювачів ($CO_2 + H_2O$) у газі. Практично досягнуті значення вмісту окислювачів становлять 1-3%. Аналогічні умови газифікації вугілля і якості отриманого газу мають місце у розплаві.

Таким чином, з позицій вимог доменної плавки найбільш придатні засоби газифікації вугілля - це засоби газифікації у вихровому струмі, конкретно в циклонних і вихрових апаратах, де поліпшується тепло-масообмін, а також у розплаві. Великий інтерес має комбінація цих засобів.

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ ГАЗИФІКАЦІЇ ПИЛОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА У ЦИКЛОННИХ АПАРАТАХ

Вибрана розрахункова модель процесу газифікації вугілля, яка базується на основних положеннях механіки гетерогенних середовищ і методології елементарного балансу. Обґрунтовані межі зміни вхідних параметрів і виконані багатоваріантні розрахунки.

Аналіз результатів виконаних розрахунків показав :

- збільшення вологості, зольності і вмісту летучих у вугіллі знижує температуру отриманого газу відповідно на $16-32^{\circ}\text{C}$ на кожний 1% води, $3-4,5^{\circ}\text{C}$ на кожний 1% золи і $6,5-11^{\circ}\text{C}$ на кожний 1% летучих, а підігрів вугілля збільшує температуру газу на 3°C на кожні 10°C підігріву;

- кількість газу на одиницю вугілля знижується зі зростанням зольності і вологості вугілля і декілька збільшується зі зростанням вмісту летучих, при цьому частка водню у газі збільшується на $0,38-0,48\%$ на кожний 1% води і на $0,7\%$ на кожний 1% летучих;

- збільшення температури газу при заданому складі вугілля досягається збільшенням температури окислювача ($35-50^{\circ}\text{C}$ на кожні 100°C температури окислювача) і вмісту в ньому кисню ($8,5-12,4^{\circ}\text{C}$ на кожний 1% O_2) при зменшенні вологості ($18-23^{\circ}\text{C}$ на кожний 1% води); при цьому збагачення киснем сприяє збільшенню кількості газів на одиницю вугілля і частки в них відновних компонентів ($\text{CO} + \text{H}_2$), а зниження вологості декілька зменшує кількість водню;

- кількість твердого вуглецю регулюється коефіцієнтом надлишку окислювача, збільшення якого від $0,3$ до $0,5$ моль/моль при—водить до скорочення вмісту твердого вуглецю у газі від $100-140$ г/м³ до нуля; при цьому кількість газу на одиницю вугілля збільшується у $1,5$ рази при зростанні у ньому частки оксиду вуглецю і азоту і зменшенні частки водню, а температура зростає зі швидкістю 80°C на кожний $0,1$ моль/моль в разі холодного атмосферного дуття, 135° в разі нагрітого до 1000°C атмосферного дуття і 180°C - в разі холодного дуття, збагаченого киснем до 40% ;

- об'ємна частка окислювачів у газі ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) залежить, головним чином, від його температури: при температурі вище 1100°C вона не перевищує 1%.

Експериментальна перевірка можливостей одержання газів, відповідуючих вимогам доменного процесу, виконана на двох установках - циклонній шлакоплавильній установці заводу ім. Петровського і стендовій установці ІВАН, що включає вихровий реактор-газифікатор, розроблений щодо газифікації пиловугільного палива для доменної плавки. В першому випадку встановлена можливість одержання високотемпературного відновного газу, але частка окислювачів в ньому була збільшеною від недостатніх швидкостей окислювачів і ма-

лого часу перебування часток вугілля у реакційній зоні, що обумовлено специфічною конструкцією циклону, призначеною для одержання синтетичного шлаку. У другому випадку одержані розрахункові склад і температура газу при частці окислювачів ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) 1-2%, прийнятні для доменної плавки.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ГАРЯЧИХ ВІДНОВНИХ ГАЗІВ-ПРОДУКТІВ ГАЗИФІКАЦІЇ ВУГІЛЛЯ НА ВИТРАТИ ПАЛИВА У ДОМЕННІЙ ПЛАВЦІ

Основною задачею нової технології є скорочення витрат коксу. Оскільки одне і те ж заощадження коксу може бути одержано при різних параметрах гарячих відновних газів і, відповідно в різну витратою енергоресурсів, вирішується задача вибору варіантів, що дають найменші витрати умовного палива на одиницю заощадженого коксу у комплексі доменна піч-газифікатор вугілля.

Ідея дослідження містить наступне. Задають безліч складів і температур гарячих відновних газів - продуктів газифікації вугілля. По цих складах і температурах на засаді матеріального і теплового балансів газифікатору встановлюють вхідні характеристики газифікації (витрат вугілля заданого складу, атмосферного дуття, кисню і вологи). За цими ж складами і температурами виконується розрахунок показників доменної плавки з встановленням витрат енергоресурсів (коксу, природного газу, гарячого відновного газу, кисню, атмосферного повітря, пару і ін.).

Для вивчення впливу параметрів ГВГ на заощадження коксу в доменній плавці використали математичну модель ІЧМ, яка ґрунтується на двовонному тепловому балансі зі змінюючися в залежності від умов температурною межею зон теплообміну і розбігу температур шихти і газу на цій межі, а також з використанням кинетичних залежностей процесу відновлення заліза і закономірностей газодинаміки доменної плавки. Великі прогновні можливості цієї моделі дозволяють оцінити показники доменної плавки при різноманітних режимах і з різними параметрами ГВГ.

Витрату умовного палива для комплексу доменна піч - реактор-газифікатор вугілля встановили за двома групами параметрів - витрат

енергоресурсів (окрім коксу) в доменній плавці, отриманих розрахунком за моделлю доменного процесу, і витрат енергоресурсів при газифікації вугілля. Друга група параметрів визначалась на засаді матеріальних і теплових балансів процесу газифікації при заданих параметрах ГВГ. На одержання 1м^3 ГВГ потребується: вугілля (з балансу вуглецю)

$$y = \frac{\frac{12}{22,4} (CO + CO_2) + C_T}{(1-Z) \cdot C_Y} \quad \text{кг/м}^3$$

вологи V_{H_2O} (з балансу водню):

$$V_{H_2O} = H_2 + H_2O - U \cdot H_2^r (1-Z) \frac{22,4}{2} - U \cdot W \cdot \frac{22,4}{18} \quad \text{м}^3/\text{м}^3$$

технічного кисню V_{O_2} (з балансу кисню):

$$V_{O_2} = \frac{1}{W_T} (CO_2 + 0,5CO + 0,5H_2O - w_a \cdot V_{av} - U \cdot W \cdot \frac{22,4}{18 \cdot 2} - Y(1-Z) \frac{22,4}{32} \cdot O_y) \quad \text{м}^3/\text{м}^3$$

атмосферного повітря V_{av} (з балансу азоту):

$$V_{av} = \frac{1}{1-w_a} (N_2 - U \cdot (1-Z) \cdot N_y \frac{22,4}{28} - V_{O_2} (1-w_T)) \quad \text{м}^3/\text{м}^3 \quad \text{де}$$

CO, CO_2, H_2, H_2O, N_2 - об'ємні частки компонентів у ГВГ, $\text{м}^3/\text{м}^3$;
 $Ст$ - вміст твердого вуглецю у ГВГ, кг/м^3 ; W, Z, C_y, H_y, O_y, N_y - масові частки води, золи у робочій масі і вуглецю, водню, кисню, азоту у паливній масі вугілля, кг/кг ; w_a, w_T - об'ємна частка кисню у атмосферному повітрі і технічному кисні, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

При заданій температурі ГВГ і обчислених матеріальних характеристиках з балансу тепла газифікатора визначається потрібна ентальпія окислювача (дутья газифікатора):

$$Q_A^r = [T_{ГВГ} \cdot C_{ГВГ} \cdot (1 - \eta_{пот}) - \frac{12}{22,4} \cdot 10400 \cdot (CO_2 + CO - 2 \cdot U \cdot O_y \frac{22,4}{32}) + 12644 \cdot CO_2 + 10802 \cdot (H_2O - V_{H_2O}) - 17893 \cdot U \cdot W - U \cdot Z \cdot C_Z \cdot T_{ГВГ} - \sigma_T \cdot C_{\sigma} \cdot T_{ГВГ}] \quad \text{кДж/м}^3, \quad \text{де};$$

$C_{ГВГ}, C_{\sigma}, C_Z$ - питома теплоємність ГВГ (кДж/м^3), твердого вуглецю і золи вугілля (кДж/кг) відповідно;

щот - відносна величина втрат тепла у газифікаторі, кДж/кДж
 Теплоти: 10400 - горіння вуглецю до CO, кДж/кг;
 12644 - окислення CO в CO₂, кДж/м³;
 10802 - окислення H₂ в H₂O, кДж/м³;
 17893 - нагріву, випарення и диссоціації вологи
 вугілля, кДж/кг

Для отримання ГВГ витрачається вугілля, паливо для нагріву дуття, водяний пар, кисль та енергія для стиснення дуття и кисню.

Витрати умовного палива для одержання ГВГ (кг/м³), може бути встановлена в виразу:

$$\begin{aligned}
 \text{УТГВГ} = & \frac{U \cdot Q_u}{29310} + 0,3 \cdot V_{O_2} + \frac{Q_d}{29310 \cdot \text{КПДвн}} + (V_{H_2O} - V_{ав} \cdot U_{ав}) \cdot \\
 & 4616 \\
 & * \frac{1}{29310 \cdot \text{КПДпг}} + 0,035 \cdot (V_{ав} + V_{O_2}) \quad , \quad \text{де}
 \end{aligned}$$

Q_у, кДж/кг - теплотворність вугілля, встановлена за формулою Д. І. Менделєєва;

КПДвн, кДж/кДж - коефіцієнт корисної дії повітрянагрівача;

КПДпг, кДж/кДж - коефіцієнт корисної дії парогенератора; 0,3

0,035, кг/м³ - витрата У^т для одержання і стиснення дуття;

29310, кДж/кг - теплотворність УТ; 4616, кДж/м³ - ентальпія водяного пару при 300°С.

Для заміни коксу у доменній плавці окрім ГВГ витрачається кисень, а в процесі виділяється природний газ, атмосферне дуття і паливо для нагріву цього дуття. В решті переходу на нову технологію змінюється кількість колошникового газу, що використовується як паливо для інших виробництв підприємства. Необхідна витрата умовного палива для заміни коксу (УТк, кг/т чзв) може бути встановлена за виразом:

$$\begin{aligned}
 \text{УТк} = & \text{УТГВГ} \cdot \text{ГВГ} + \frac{V_{O_2}^* - O_2^*}{V_d^* \cdot t_d \cdot C_d} \cdot 0,3 - (V_d^* - O_2^*) \cdot 0,035 - \Pi^* \cdot 1,15 \\
 & - \frac{Q_{кг}^* - Q_{кг}}{29310 \cdot \text{КПДвн}} + (Q_{кг}^* - Q_{кг}) / 29310 \quad ;
 \end{aligned}$$

Те ж на 1 кг заміненого коксу, кг/кг:

УТк

РУТ = ----- , де

ЭК

ГВГ, O₂, Qкг, ЭК - витрати гарячого відновного газу, кисню (м³/т чавуну), теплотворність колошникового газу (кДж/т чавуну) і заощадження коксу від вдування ГВГ (кг/т чавуну) у доменній плавці, встановлені за моделлю доменного процесу.

Верхній індекс "о" означає належність до базового режиму доменної плавки, причому:

о о о

Вд, ПГ, тд, Сд - витрати дуття і природного газу (м³/т), температура і питома теплоємність дуття, відповідно, °С и кДж/м³ К

1,15 - коефіцієнт перерахунку природного газу в умовне паливо, кг/м³.

Для розрахунків за моделлю доменного процесу і методикою оцінки витрат умовного палива прийняли початкові параметри роботи ДП комбінату "Запоріжсталь", притаманні до умов України.

Оцінка впливу параметрів ГВГ на витрати коксу в доменній плавці виконувалась на засаді 150 варіантів розрахунків при варіації складу і температури газу в межах: CO - 27-74%; H₂ - 10-60%; (CO₂+H₂O) - 0-5%; N₂ - 5-60%; Tгвг - 1100-1500°С; Ст - 0-200 г/м³ (міра газифікації 50-90%). Результати узагальнені графічно і виражені спрощеними рівняннями для еквіваленту заміни коксу ГВГ:

$$Эзгвг = 0,2CO + 0,3H_2 - 1,5(CO_2 + H_2O) - 0,18N_2 + 0,00019Tгвг + 1,7Ст \text{ (кг/м}^3\text{)}$$

CO, H₂, CO₂, H₂O, N₂ - об'ємні частки відповідних компонентів у ГВГ, м³/м³; Tгвг - температура ГВГ, °С; Ст - вміст твердого вуглецю у ГВГ, кг/м³

Частка відновлювачів у ГВГ - (CO + H₂) лінійно впливає на Эзгвг, збільшуючи його до 80%, після чого підвищення концентрації відновних компонентів не тільки не збільшує, але декілька знижує заощадження коксу. Це обумовлено тим, що при високому відновному потенціалі газів у доменній печі швидко досягається повне відновлення оксидів заліза тепремим шляхом, і подальше збільшення витрат

ГВГ не знижує міру прямого відновлення і відповідно не сприяє заощадженню тепла. Гази виконують лише роль теплоносія. Це скорочує питоме заощадження коксу ($\text{кг/м}^3\text{ГВГ}$), що дозволяє вважати додаткові витрати на одержання ГВГ зі вмістом азоту менше 20% для вдування у доменні печі недоцільним.

Наявність окислованих компонентів у газі ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) різко знижує ЗЗГВГ, а підвищення температури збільшує його, причому кожний 1% окислювачів еквівалентний зниженню температури ГВГ на 80°C .

Наявність часток твердого вуглецю збільшує ЗЗГВГ, причому у більшій мірі, ніж вдування сировинного вугілля у зв'язку з близькою підготовленістю часток до газифікації, однак припустимий вміст їх у ГВГ обмежений умовами спалювання у фурмених вогнищах ДП.

Загальне заощадження коксу від вдування ГВГ (ЗК) залежить не тільки від ЗЗГВГ, але також і від загальних витрат ГВГ при заданій теоретичній температурі у вогнищі. Вираз для нього має вигляд:

$$\text{ЗК} = -150 + 296 \cdot \text{CO} + 397 \cdot \text{H}_2 - 1586(\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}) + 0,24 \cdot \text{TГВГ} + 1360 \cdot \text{Ст} \quad (\text{кг/т})$$

при $(\text{CO} + \text{H}_2) < 0,8$

Відмінність у змісті рівнянь для ЗЗГВГ і ЗК у тому, що перше дає заощадження на одиницю ГВГ у "чистому вигляді", а друге - сукупний вплив вдування ГВГ, вилучення з процесу природного газу і заміни гарячого атмосферного дуття холодним киснем, доданим до фурми доменної печі.

Результати розрахунку витрат умовного палива (РУТ) на одиницю заощадженого коксу показали наступне:

1. Витрата умовного палива (РУТ) на одиницю заощадженого коксу знижується при збільшенні температури і вмісту CO у ГВГ.

2. При $\text{TГВГ} > 1300^\circ\text{C}$ і $\text{N}_2 < 30\%$ збільшення частки відновлювачів і відповідно зменшення частки азоту не приводить до зниження РУТ, а починає збільшувати його.

3. Збільшення вмісту водню у ГВГ приводить до лінійного збільшення РУТ, бо воно зв'язане з витратами тепла на диссоціацію вологи у дутті.

4. Вміст твердого лишку у ГВГ сприяє зменшенню РУТ, причому найбільш значному при високому вмісті азоту. При $\text{N}_2 < 30\%$ доцільно підтримання Ст на рівні не більш 50 - 80 г/м^3 .

Б. Оскільки наявність окислювачів ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) у ГВГ приводить до збільшення витрати коксу, воно однозначно збільшує РУТ.

Із загального масиву варіантів зробили виборку мінімальних значень РУТ, відповідаючих $\text{CO}_2 = 1\%$, $\text{H}_2\text{O} = 0$, $T_{\text{ГВГ}} = 1500^\circ\text{C}$ при різних значеннях N_2 і відповідних параметрах газифікації вугілля (Тд, w, ψ) і доменної плавки:

Таблиця 1

: Заощадження :						
$N_2, \%$	коксу, кг/т	РУТ, кг/кг	Тд, $^\circ\text{C}$	w, %	$\psi, \%$	
50	117	1,570	1700	16,8	13,6	
40	182	1,527	1170	29,2	7,4	
30	179	1,345	300	43,0	0,4	
20	201	1,355	1800	47,0	26,2	
5	207	1,358	-	86,0	21,2	

Аналіз виборки показує, що мінімальна величина РУТ при $T_{\text{ГВГ}} = 1500^\circ\text{C}$ відповідає $N_2 = 30\%$ і становить 1,345 кг/кг. Одержання такого газу забезпечується у газогенераторі практично без нагріву дуття при атмосферній його вологості і збагаченні киснем до 43%. Витрата коксу за розрахунком досягає 292 кг/т при витраті ГВГ 1163 $\text{м}^3/\text{т}$ (витрата вугілля 487 кг/т чавуну).

Збільшення St знижує значення РУТ при $N_2 = 30\%$ и $T_{\text{ГВГ}} = 1500^\circ\text{C}$ до 1,17 - 1,25 кг/кг, а загальне заощадження коксу збільшує в 179 до 262 кг/т, але для досягнення цих значень потрібні нагрів дуття до 1000 - 1200 $^\circ\text{C}$. Витрати коксу знижується до 209 кг/т при витраті ГВГ 1050 $\text{м}^3/\text{т}$ і відповідній їй витраті вугілля 490 кг/т.

Припустимо значення St визначається можливістю повного палення твердого вуглецю у фурменому вогнищі ДП. Практика роботи ДП з вдуванням великої кількості пиловугільного палива показала можливість достатньо повного палення вуглецю у фурменному вогнищі при витраті його 130 - 200 кг/т чавуну, що відповідає 500-550 $\text{г}/\text{м}^3$ кисню дуття. Незважаючи на меншу концентрацію кисню в дуттєвому струмі ГВГ у порівнянні з дуттям звичайного режиму умови окислення часток вуглецю тут не гірше, бо вони нагріті до $T_{\text{ГВГ}}$ и підготовлені струк-

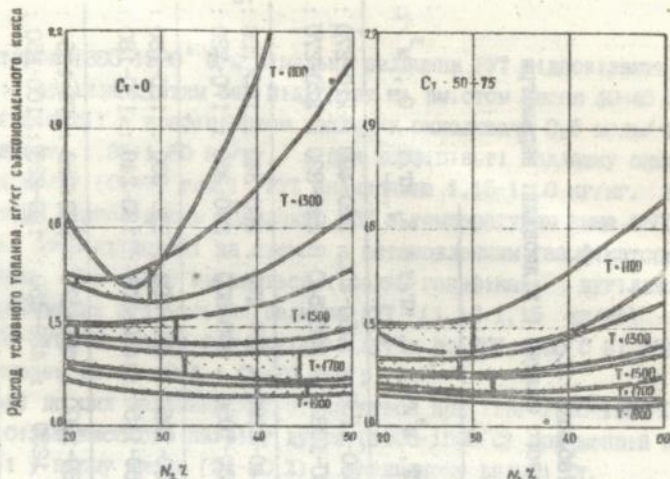
турно. Оскільки при вдуванні ГВГ відношення додаваного у струмі кисню до ГВГ становить 0,12-0,15 м³/м³, це відповідає

$$C_T = (500 \div 550)(0,12 \div 0,15) = 60 \div 80 \text{ г/м}^3 \text{ ГВГ}$$

Вказані значення відповідають коефіцієнту надлишку окислювача на вході газифікатора (з урахуванням кисню вугілля) - 0,4 моль/моль. Таким чином, підтримання на вході газифікатора коефіцієнта надлишку окислювача 0,4 забезпечує припустимий з умов роботи фурменних вогнищ вміст часток твердого вуглероду у ГВГ. З рахунком цього, а також для визначення мінімальних значень РУТ і умов їх одержання при $T_{ГВГ} > 1500^\circ\text{C}$ провели додаткову серію розрахунків зі зміною N_2 в межах 50-20 %, $T_{ГВГ}$ - від 1100 до 1900^oС при $CO_2 = 1\%$, $H_2O = 0\%$. Вміст твердого углецю змінювали від 0 до можливого значення відповідаючого коефіцієнту надлишку окислювача 0,4 моль/моль, яке становило для $N_2 = 50\%$ - 50 г/м³, для $N_2 = 40\%$ - 60 г/м³, для $N_2 = 30\%$ - 67 г/м³. Вміст водню у ГВГ визначався з умови підтримання вологості дуття газифікатора на рівні атмосферної і залежало від кількості водню у вугіллі (останнє задано 5%). Розрахунки виконані, як і вище, при умовах збереження на рівні базового режиму теоретичної температури горіння - 2040^oС, а також при умові зниження її до 1900^oС у режимі вдування ГВГ за рахунок подачі додаткової кількості ГВГ. Останнє можливо у зв'язку з визволенням фурменних вогнищ від роботи по реформації сировинних паливних додатків, але обмежує можливість збільшення C_T в ГВГ.

Результати розрахунків подані у вигляді залежностей витрат умовного палива від вмісту азоту у ГВГ для значень температури ГВГ 1100-1900^oС при $C_T=0$ і $C_T=50-75$ г/м³. Залежності апроксимовані квадратичними параболою з високою мірою приближення (середня помилка апроксимації 1 %, відн.) і подані графічно на мал.1. Області між кривими, відповідаючими робочим режимам доменної плавки з теоретичною температурою горіння 1900 - 2040 С, заштриховані, а вони між мінімальними значеннями РУТ на суміжних кривих відмічені подвійною штриховкою. При цьому оптимальні значення N_2 і відповідне мінімальні значення РУТ встановлені з рівняння

$$\partial(PUT)/\partial N = 0$$



Мал. 1 Залежність витрати умовного палива для заміни коксу від вмісту азоту у ГВГ.

Зі збільшенням $T_{гвг}$ зони мінімальних значень РУТ зміщуються у область великих значень вмісту азоту у ГВГ. Зона мінімальної витрати умовного палива на одиницю заощадженого коксу відповідає вмісту азоту у ГВГ 20-32 % при $T_{гвг} < 1500^{\circ}\text{C}$. Якщо в умов тракту подавання ГВГ у ДП припустима $T_{гвг} > 1500^{\circ}\text{C}$, тоді зона мінімальних значень РУТ відповідає вмісту азоту у ГВГ 35-55 %. У першому випадку газифікацію ведуть на дутті із вмістом кисню 35-45 % без підігріву, у другому - 21-40 % з підігрівом дуття. Характерно, що вплив вмісту твердого вуглецю у ГВГ на витрати умовного палива зі збільшенням температури ГВГ зменшується, і при $T_{гвг} = 1900^{\circ}\text{C}$ стає неістотним.

У таблиці 2 приводяться межі параметрів ГВГ ($T_{гвг}$, St , N_2) при мінімально-можливих значеннях РУТ і відповідні їм межі режимів газифікації (w , t_d); а також параметрів доменної плавки (витрати коксу - K , ГВГ і відповідні вугілля - U і O_2).

Мінімальне значення РУТ при одержанні ГВГ з температурой до 1300°C відповідають газифікації вугілля дуттям зі вмістом кисню 35-40 % без підігріву. При цьому коефіцієнт надлишку окислювача повинен бути на рівні 0,4 моль/моль ($St = 70 \text{ г/м}^3$). При одержанні ГВГ з

Таблиця 2.

Межі параметрів ГВГ при мінімально-можливих витратах умовного палива і відповідні параметри режимів газифікації вугілля і доменної плавки.

Температура, °С	Ст., г/м ³	N ₂ , %	РУТ, кг/кг	w, %	t _д , °С	ГВГ, м ³ /т	У, кг/т	К, кг/т	O ₂ , м ³ /т
1100-1300	0 : 70	20-30	1,50-1,80	40-45	(-)	1050-1150	1450-400	320-400	210-270
1300-1500	0 : 70	25-32	1,35-1,50	40-45	(-)	1140-1160	450-470	290-340	170-220
1500-1700	0 : 70	30-35	1,25-1,25 [*]	45-50	0	1200-1250	450-500	230-300	120-180
1700-1900	0 : 60	35-45	1,10-1,25	30-40	1000-1300	1280-1300	450-470	200-250	75-125
		45-55	1,07-1,13	21-30	1300-1500	1230	430-450	180-220	100-150

* для деяких заданих складів ГВГ розрахункові значення температури плавки виявились нереальними (-).

температурою 1300-1500° С мінімальні величини РУТ відповідають газифікації вугілля дуттям без підігріву зі вмістом кисню 40-45 %. В разі газифікації з коефіцієнтом надлишку окислювача 0,5 моль/ моль РУТ становить 1,35-1,50 кг/кг, а при коефіцієнті надлишку окислювача 0,4 кг/кг (Ст=70 г/м³) РУТ значно вище 1,15-1,30 кг/кг. Вказані режими відповідають подаванню ГВГ з температурою вище 1500° С і можуть бути здійснені за схемою з встановленням газифікатора на кожну фурму. При цьому змінюється і режим газифікації вугілля:

для отримання мінімальних величин РУТ (1,10-1,15 кг/кг) при Тгвг-1500-1700°С потрібен підігрів дуття до 800-1000°С зі збагаченням киснем до 40-43 % і Ст=70 г/м³;

близькі до цих величини РУТ отримуються при Тгвг=1700-1900°С за рахунок більш високого нагріву дуття (1000-1500°С) при меншій концентрації у ньому кисню (21-40 %) і незначному впливі Ст.

РОЗРОБКА ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ПО РЕАЛІЗАЦІЇ НОВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

Аналіз відомих енерго-технологічних схем і технічних рішень до вдуванню продуктів газифікації вугілля у доменну піч показав перспективність альтернативних розробок по двох схемах: з встановленням реактора-газифікатора (РГ) на кожному фурменному пристрої і встановленням центрального газифікатора для домечної печі з розводкою ГВГ по фурмах.

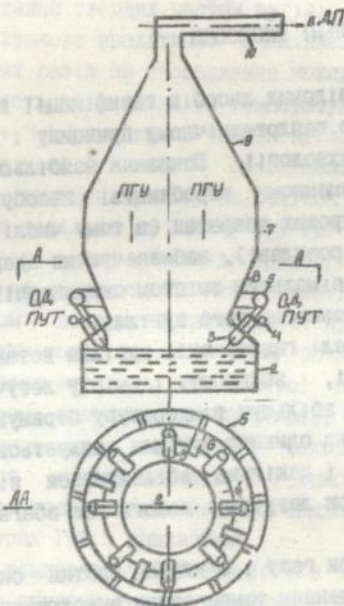
Роботи по другій з цих схем, що виконуються кафедрою промислової теплоенергетики ДМетАУ на протязі декількох років, спрямовані на підвищення продуктивності одиничного газифікатора при забезпеченні якості цільового газу. В межах розроблюемого на кафедрі напрямку по секціонуванню одиничних газифікаторів за участю автора розроблено циклонний газифікатор, включаючий з'єднані між собою секції з єдиним збірником золотого розплаву. Конструкція відрізняється тим, що засіб для подавання здрібненого вугілля у циліндричну камеру виконаний у вигляді декількох груп подаючих патрубків, відстань між нижніми зрізами кожної суміжної групи яких становить 0,13-0,15 висоти камери, а кромки патрубків розташовані на рівні зрізу верхньої кромки сопла для вводу окислювача і їх осі віддалені від внутрішньої стінки камери на відстань 2,3-3,0 радіусу вихідного

арізу сопла. Сопла для подавання окислювача розташовані перпендикулярно осям патрубків, їх кількість залежить від продуктивності газифікатора і змінюється від двох до чотирьох на кожен камеру. Кількість суміжних камер залежить від загальної продуктивності усієї установки. На вказане технічне рішення отримане авторське свідоцтво N- 2812206.

Секціонування одиничних РГ викладеним засобом має і ряд недоліків, зв'язаних з обмеженням кількості одиничних РГ при розташуванні у лінію, а також нерівномірною обробкою газу у золотовому розплаві і відокремленням зольних часток від газу, особливо при відключенні окремих РГ. Останнє погіршує якість газу по вмісту окислювачів і зольних часток.

Для поліпшення якості газу і можливості збільшення продуктивності газифікатора запропоновано багатосекційний РГ, в якому одиничні РГ розташовані по колу циліндричного збірника золотового розплаву, при цьому повздовжні осі вихідних патрубків для продуктів газифікації вугілля і рідкої золи нахилені під кутом 40-50 до горизонтальної площини, проведеної через циліндричний збірник золотового розплаву.

Багатосекційний РГ (мал.2) включає багатосекційний блок 1 одиничних РГ, єдиний циліндричний збірник золотового розплаву 2, по колу якого розташовані одиничні РГ з вихідними патрубками 3 для продуктів газифікації вугілля і рідкої золи. При цьому поздовжні осі вихідних патрубків 3 встановлені під кутом 40- 50 до горизонтальної площини, проведеної через циліндричний збірник золотового розплаву. До кожного одиничного РГ підведені магістралі: 4 - для подачі пилувугільного палива, 5 - для подачі окислювального дуття (ОД). Крім того, від магістралі 5 виконано підвід 6 для подачі невеликої кількості ОД до збірника золотового розплаву. Над збірником золотового розплаву розташована відводяча шахта 7, розширювана уверх в нижній частині 8, а потім звужується у верхній частині 9 при переході до трубопроводу 10 для подачі продуктів газифікації вугілля (ПГУ) у доменну піч.



Мал. 2 Багатосекційний газифікатор.

У кожний одиничний РГ подають ПУТ і ОД при коефіцієнті надлишку окислювача 0,4-0,5. В об'ємі і на стінках кожного РГ проходить газифікація вугілля і перехід золи у рідину з утворенням ПГУ - гарячих відносних газів з температурою 1500-2000 С, які містять оксид вуглецю, водень, азот і невелику кількість окислювачів у вигляді діоксиду вуглецю і води (1-2%). Після цього ПГУ і рідкі частки золи через вихідні патрубки одиничних РГ вдуваються в рідку ванну золотого расплаву, де звершується остаточна газифікація недоокислених часток і перегрів недогрітих золових часток за рахунок додаткової топачі у рідку шлакову ванну невеликої кількості ОД. У струмі ПУТ і у рідку ванну подають також флюсуєчі добавки, що сприяє одержанню рухомих шлаків.

Наведене технічне рішення по конструкції багатосекційного РГ може бути реалізовано як шляхом спорудження спеціального нового

агрегату у комплексі доменної печі, так і шляхом використання існуючого обладнання комплексу доменної печі.

Одне з рішень засноване на тому, що для газифікації ПУТ використовується повітрянагрівач.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На засаді аналізу відомих засобів газифікації вугілля виконана їх класифікація по теплотехнічному принципу і дана оцінка з позицій вимог доменної технології. Показана найбільша придатність для використання у доменному виробництві засобу газифікації вугілля у циклонних і вихрових апаратах (в тому числі у сполученні із засобом газифікації у розплаві), забезпечуючих одержання газу з високою температурою і мінімальним вмістом окислювачів ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) практично з будь-якого низькосортного вугілля.

2. Розрахунками по моделі газифікації вугілля встановлено:

- збільшення вологості, зольності і вмісту летучих у вугіллі знижує, а його підігрів збільшує температуру отриманого газу; при цьому кількість газу на одиницю вугілля знижується зі зростанням зольності і вологості і декілька збільшується зі зростанням вмісту летучих; за рахунок летучих і вологи газ збагачується воднем;

- збільшення температури газу і зниження частки окислювачів в ньому досягається підвищенням температури окислювача ($35-50^\circ\text{C}$ на 100°C температури окислювача) і вмісту в ньому кисню ($8,5-12,4^\circ\text{C}$ на кожну 1% O_2) при зменшенні вологості ($18-23^\circ\text{C}$ на кожну 1% вологи); при цьому збагачення киснем сприяє збільшенню кількості газів на одиницю вугілля і частки в них відновних компонентів ($\text{CO} + \text{H}_2$), а зниження вологості декілька зменшує кількість водню;

- кількість твердого вуглецю в газі регулюється коефіцієнтом надлишку окислювача, збільшення якого від 0,3 до 0,5 моль/моль приводить до скорочення концентрації твердого вуглецю у газі від $100-140 \text{ г/м}^3$ до нуля при зростанні кількості газу на одиницю вугілля: 1,5 рази і температури на 160°C при холодному атмосферному дутті і на $270-360^\circ\text{C}$ при нагрітому збагаченому киснем дутті.

3. Можливість одержання розрахункового складу газу підтверджена експериментально на двох установках. Показано, що для досяг-

нення мінімального вмісту окислювачів ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) у газі, відповідного вимогам доменного процесу (1-2%), необхідно використання вихрових апаратів спеціальної конструкції, забезпечуючих високу повноту реагування твердих часток вугілля з окислювачем.

4. Розрахунково-аналітичне дослідження впливу параметрів гарячих відновних газів на заощадження коксу у доменній плавці показало необхідність збільшення їх температури, вмісту відновних компонентів ($\text{CO} + \text{H}_2$) і твердих часток вуглецю, а також зниження до мінімально-можливої кількості окислювальних компонентів ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$). При цьому виділення азоту за рахунок збагачення киснем дуття газогенератора доцільне до вмісту N_2 у ГВГ не вище 20%. Результати дослідження узагальнені у вигляді зручного для практичного користування рівняння залежності еквіваленту заміни коксу гарячим відновним газом - продуктом газифікації вугілля.

5. Для оптимізації параметрів ГВГ по критерію мінімуму енерговитрат розроблена методика комплексної оцінки витрат енергоресурсів у системі доменна піч-газифікатор вугілля і виконані багатоваріантні розрахунки по цій методиці у сполученні з розрахунками по моделі доменного процесу. Визначені величини витрат умовного палива на одиницю заощадженого коксу (PУТ) при різних параметрах ГВГ і визначено:

збільшення температури ГВГ і вмісту в ньому оксиду вуглецю і твердих часток вуглецю сприяє зниженню PУТ, а підвищення частки окислювачів і водню - збільшенню;

при $T_{\text{ГВГ}} > 1300^\circ\text{C}$ і $\text{N}_2 < 30\%$ збільшення частки відновлювачів і твердого вуглецю не приводить до зниження PУТ.

6. Аналіз розрахункових режимів газифікації вугілля з позицій мінімізації енерговитрат дозволив визначити найкращі параметри, відповідаючі різним припустимим з умов тракту годячі максимальним температурам ГВГ.

Мінімальні величини PУТ на одиницю заощадженого коксу при одержанні ГВГ з температурою до 1300°C відповідають газифікації вугілля дуттям із вмістом кисню 35-40 % без підігріву при коефіцієнті надлишку окислювача 0,4 моль/моль. Одержаний від вдунання у доменну піч ГВГ містить 20-30% азоту і до 70 г/м^3 твердого вуглецю. Аналогічні режими при одержанні ГВГ з температурою до 1500°C відрізняються збагаченням дуття газифікатора киснем до 40-45% і

відповідно вмістом азоту у ГВГ 25-32%.

В разі встановлення газифікаторів на кожному фурму і можливості збільшення температури ГВГ до 1700°C мінімальні величини витрат умовного палива отримані при газифікації вугілля підігрітим до 800-1000°C дуттям із вмістом кисню 40-43% і коефіцієнті надлишку окислювача 0,4.

При збільшенні припустимої температури ГВГ до 1900°C оптимальні режими газифікації змищуються у область підвищення температури дуття (1000-1500°C) і зниження вмісту в ньому кисню (40-21%) при коефіцієнті надлишку окислювача 0,45-0,5. Оптимальний вміст азоту у ГВГ збільшується до 35-50%, а вміст твердого вуглецю знижується до 30-0 г/м³.

7. Для реалізації нової технології і оптимальних режимів її функціонування запропонований новий принцип секціонування одиничних газифікаторів шляхом встановлення їх по колу циліндричного збірника золотого розплаву і розроблені технічні рішення на рівні винаходів, забезпечуючі потрібну якість цільового газу при збільшенні продуктивності багатосекційних газифікаторів.

Основні результати роботи викладені у наступних друкуваннях:

1. Адаптация математических моделей поточной парокислородной газификации пылеугольных топлив для приближенного анализа процессов в циклонных камерах /В. П. Пацков, В. В. Потапов, А. Н. Веденьев, Г. И. Товаровская и др. // Проблемы газификации углей. Сборник докладов. - Красноярск, 1991. - С. 142-150.

2. Получение и применение продуктов газификации угля в доменной плавке / И. Г. Товаровский, И. И. Солодкий, И. Я. Толмачев, Ю. А. Дронов, Е. Г. Шадек, Г. И. Товаровская // Москва, 1992. - 100 с.

3. Энерготехнологическая схема малококсового процесса получения чугуна с использованием восстановительного газа / В. В. Потапов, А. Н. Веденьев, Г. И. Товаровская // Проблемы преобразования энергии и рационального использования органического топлива в энергетике: Тез. докл. научно-техн. семинара Киев, 1992 г.

4. Влияние параметров продуктов газификации угля на расход кокса в доменной плавке / И. Г. Товаровский, В. В. Потапов, Г. И. Товаровская // Сборник докладов международного симпозиума на Донецком металлургическом предприятии. Донецк, 1992 г.

5. Принципы разработки и оптимизации энергосберегающих технологий высокоскоростных углей/В. Б. Потапов, А. Н. Веденъев, Г. И. Товаровская и др. // Тез. докл. 3-й Всесоюзной научной конференции по проблемам теплотехнологии. Москва, 1992 г.

6. Потапов В. В., Товаровская Г. И., Товаровский И. Г. Исследование влияния параметров горячих восстановительных газов, вдуваемых в фурменную зону доменной печи, на расход кокса// Металлургическая и горнорудная промышленность. - Днепропетровск, 1993. - N-3. - С. 3-6.

7. Товаровский И. Г., Потапов В. В., Товаровская Г. И. Выбор параметров горячих восстановительных газов - продуктов газификации угля для вдувания в доменную печь// Сталь. - 1994. - N-5.

8. Товаровский И. Г., Солодкий И. И., Товаровская Г. И. Влияние параметров комбинированного дутья на температурный потенциал фурменного газа и тенденции его изменения при обогащении дутья кислородом //Металлургическая и горнорудная промышленность. - Днепропетровск, 1989. - N -3. -С. 4-6.

9. А. с. 1812206 СССР, М. Кл С 10 J 3/48. Циклонный газификатор/ В. Б. Потапов, А. Н. Веденъев, Г. И. Товаровская и др. //Открытия. Изобретения. - 1993. - N-16.

тез

AB 30.381