Галузь техніки

Загалом даний винахід відноситься до способу експлуатації установки доменної печі, а також до такої установки доменної печі.

Рівень техніки

Незважаючи на альтернативні способи, такі як плавлення металевого брухту або відновлення в електродуговій печі, доменна піч на сьогодні є найбільш широко використовуваним процесом виробництва сталі. Однією з проблем установки доменної печі є доменний газ (BFG), що виходить з доменної печі. Оскільки цей газ виходить із доменної печі у її верхній частині, його зазвичай також називають верхнім газом. Хоча на початку цьому доменному газу дозволяли просто виходити в атмосферу, пізніше цьому стали запобігати за допомогою використання його в електростанціях, що живляться BFG, щоб не витрачати енерговміст газу та не спричиняти надмірне навантаження на навколишнє середовище. Одним компонентом доменного газу є CO_2, який є екологічно шкідливим та головним чином некорисним для промислових застосувань. Справді, відхідний газ, що виходить з електростанції, яка живиться доменним газом, типово має концентрацію CO_2 від 20 % об. до 40 % об. Доменний газ після спалення зазвичай містить окрім вищезазначеного CO_2 значні кількості N_2, CO, H_2O та H_2. Однак вміст N_2 значною мірою залежить від того, чи використовують у доменній печі гаряче повітря або (чистий) кисень.

Головним чином для зменшення кількості використовуваного коксу або іншого джерела вуглецю було запропоновано повертати доменний газ із доменної печі, обробляти його для поліпшення його відновлювального потенціалу та вводити його назад у доменну піч для підтримки процесу відновлення. Одним способом виконання цього є зниження вмісту CO_2 у доменному газі за допомогою адсорбції з перепадом тиску (PSA) або вакуумної адсорбції з перепадом тиску (VPSA), як це розкрито у патентній заявці EP 2 886 666 A1. PSA/VPSA установки виробляють перший потік газу, який є багатим на CO і H_2, та другий потік газу, багатий на CO_2 і H_2O. Перший потік газу може бути використаний як відновлювальний газ і подаватися назад у доменну піч. Прикладом такого підходу є процес ULCOS (виробництво сталі з ультра низьким CO_2), в якому окрім рециркульованого першого потоку газу у доменну піч подають порошкоподібне вугілля та холодний кисень. Цей тип печі також називається "піччю з кисневим дуттям (OBF) з рециркуляцією верхнього газу".

Другий потік газу може бути видалений з установки та, після вилучення решти теплотворної здатності, утилізуватися. Ця утилізація спірно полягає у закачуванні багатого на CO_2 газу для зберігання у підземні порожнини. Крім того, хоча PSA/VPSA установки уможливлюють значне зниження вмісту CO_2 у доменному газі від приблизно 35 % до 5 %, вони є дуже дорогими при придбанні, підтримці та експлуатації та, крім цього, вони вимагають багато простору.

Також було запропоновано використовувати доменний газ в якості агента риформінгу для вуглеводнів для одержання синтетичного газу (що також називається сингаз), який може бути використаний для декількох промислових цілей. Згідно зі звичайним процесом риформінгу, доменний газ змішують з паливним газом, який містить щонайменше один вуглеводень (наприклад, найнижчі алкани). У так званій реакції сухого риформінгу вуглеводні паливного газу реагують з CO_2 у доменному газі з утворенням H_2 та CO. Одночасно вуглеводні реагують з H_2O у доменному газі також з утворенням H_2 та CO у так званій реакції парового риформінгу. У будь-якому випадку одержаний таким чином синтетичний газ має значно підвищену концентрацію H_2 та CO.

Проблемами із вищезгаданими рішеннями є те, що вони вимагають дорогого та технічно складного обладнання та/або не є такими, що застосовуються для роботи доменної печі.

Технічна проблема

Таким чином, метою даного винаходу є розробка нового способу експлуатації установки доменної печі, тобто доменної печі та її допоміжного обладнання, а також відповідної установки доменної печі, що уможливлює зниження викидів CO_2, що утворюються при традиційному виробництві сталі в доменній печі, і щонайменше часткове подолання вищезазначених проблем.

Загальний опис винаходу

Для досягнення цієї мети даний винахід пропонує, в першому аспекті, спосіб експлуатації доменної печі для виробництва передільного чавуну, що включає наступні стадії:

(А) нагрівання потоку вуглеводневого газу та потоку пари в першому нагрівачі для забезпечення нагрітого потоку вуглеводневого газу та пари,

(Б) подача та частковий риформінг нагрітого потоку вуглеводневого газу та пари в печі попереднього риформінгу для забезпечення потоку частково реформованого сингазу, причому, переважно, від 2 до 25 %, переважно від 5 до 18 %, метану, що міститься у вуглеводневому газі, (еквівалент) було конвертовано у CO та H_2, більш переважно, згідно з термодинамічною рівновагою при робочій температурі між 400 та 550 °C та тиску між 1 та 4 бар надлишкових,

(В) нагрівання першого потоку доменного газу з доменної печі та потоку частково реформованого сингазу в другому нагрівачі перед або після їх спільного змішування для забезпечення нагрітого потоку живлення вуглецем,

(Г) реформування нагрітого потоку живлення вуглецем у печі вторинного риформінгу для забезпечення другого потоку сингазу, та

(Д) подача другого потоку сингазу до шахти доменної печі.

У другому аспекті даний винахід пропонує установку доменної печі для виробництва передільного чавуну, що включає доменну піч, оснащену газопідводами у шахті, виконаній для подачі другого потоку сингазу в доменну піч. Доменна піч також включає перший нагрівач у гідродинамічному з'єднанні з джерелом потоку вуглеводневого газу та джерелом потоку пари, причому перший нагрівач виконаний для нагрівання потоку вуглеводневого газу та потоку пари для забезпечення нагрітого потоку вуглеводневого газу та пари, і причому перший нагрівач знаходиться у гідродинамічному з'єднанні нижче за потоком із входом печі попереднього риформінгу. Піч попереднього риформінгу виконана для часткового риформінгу нагрітого потоку вуглеводневого газу та пари для забезпечення потоку частково реформованого сингазу. Доменна піч також включає другий нагрівач у

гідродинамічному з'єднанні з верхньою частиною доменної печі, виконаної для підведення першого потоку доменного газу, причому другий нагрівач виконаний для нагрівання першого потоку доменного газу та потоку частково реформованого сингазу або окремо, або в суміші для забезпечення нагрітого потоку живлення вуглецем; і піч вторинного риформінгу в гідродинамічному з'єднанні з другим нагрівачем, причому піч вторинного риформінгу виконана для перетворення нагрітого потоку живлення вуглецем у другий потік сингазу та знаходиться у гідродинамічному з'єднанні нижче за потоком з газопідводами у шахті доменної печі. Переважно, установка доменної печі виконана для експлуатації за допомогою здійснення способу згідно з першим аспектом і як описано більш докладно нижче.

Таким чином, винахід пропонує об'єднаний спосіб та відповідну установку, що дозволяють експлуатувати доменну піч зі зниженим споживанням коксу та інших джерел вуглецю та меншим CO_2 слідом.

Дійсно, винахідники встановили, що дана технологія виробництва сингазу може бути переважно застосована до суміші вуглеводневого газу та доменного газу, забезпечуючи за допомогою цього сингаз зі складами, які особливо придатні для подачі в шахту доменної печі.

Фактично поданий спочатку в піч попереднього риформінгу вуглеводневий газ піддають частковому паровому риформінгу, перед тим як піддати вторинному риформінгу в присутності доменного газу при більш високих температурах. Оскільки доменний газ має знижений вміст вуглецю в порівнянні з природним газом, можливе збільшення відсоткового вмісту доменного газу при живленні печі вторинного риформінгу, однак подібні критичним співвідношенням значення, наприклад, співвідношення пари до вуглецю та максимально допустимі концентрації компонентів у виробленому сингазі повинні зберігатися. З цієї причини може бути переважним обмежити пропорцію доменного газу, що підлягає змішуванню з потоком вуглеводневого газу, для полегшення роботи процесу.

Дійсно, винахідники встановили, що особливо вигідна якість сингазу може бути одержана за допомогою регулювання молярного співвідношення пара/вуглець (H_2O/C) для печі попереднього риформінгу в залежності від його робочого тиску та співвіднесеної з ним можливої робочої температури до значень від 0,3 до 0,7 моль/моль, більш ідеально між 0,35 та 0,65 моль/моль, та переважно між 0,4 і 0,6 моль/моль. Робота печі попереднього риформінгу є близькою до термодинамічної рівноваги, для якої перетворення метану залежить від робочих умов, таких як температура та тиск. Точне молярне співвідношення доменного газу до вуглеводневого газу для печі вторинного риформінгу залежить від складу доменного газу та для звичайних складів його типово регулюють до приблизно 2-6, ідеально до приблизно 2,5-5, і переважно до приблизно 3-4,5.

Однією важливою перевагою даного способу та установки є те, що за допомогою регенерації частини доменного газу для повторного використання загальне вироблення CO_2 під час роботи доменної печі може бути істотно знижена.

Крім того, введення одержаного сингазу в шахту доменної печі робить можливим значне зменшення кількості коксу та/або іншого джерела вуглецю на тонну виробленого передільного чавуну, також званого питомою витратою коксу. Додатково, введення сингазу в шахту доменної печі уможливлює більш високе введення через фурми порошкоподібного вугілля або природного газу або іншого матеріалу. Отже, додаткові кількості коксу можуть бути замінені, дозволяючи опосередковано зменшити витрати на експлуатацію доменної печі та залежно від вмісту вуглецю у введеному матеріалі також викиди CO_2.

Крім того, в той час як в інших галузях промисловості рівень тиску в печах риформінгу відносно високий, у більшості випадків вище 20 бар абсолютних і навіть вище 40 бар абсолютних, при використанні доменної печі необхідний рівень тиску становить лише від 2 до 6 бар абсолютних. Це має важливий вплив на робочі умови та обмеження для риформінгу, такі як утворення вуглецю та рівноважна конверсія. У той час як більш низький рівень тиску сприятиме вищому ступеню конверсії метану при тому самому рівні температури, він, на жаль, також сприятиме утворенню вуглецю, через що використання описаної тут печі попереднього риформінгу є особливо переважним у виробництві сингазу для його використання у доменній печі.

Ця та інші переваги даного способу експлуатації доменної печі, а також розкритої в цій заявці установки доменної печі будуть більш докладно описані нижче.

У даному способі та установці доменної печі потік вуглеводневого газу та потік пари або нагрівають окремо в першому нагрівачі та потім змішують перед входом у піч попереднього риформінгу, або нагрівають у вигляді попередньо змішаного потоку вуглеводневого газу та пари.

Температура нагрітого потоку вуглеводневого газу та/або нагрітого потоку пари, або нагрітого потоку вуглеводневого газу та пари при вході в піч попереднього риформінгу на стадії (Б) зазвичай знаходиться між 300 °C та 600 °C, ідеально між 400 °C та 500 °C, переважно від 425 °C до 480 °C. Робочу температуру печі попереднього риформінгу зазвичай вибирають відповідно до умов тиску між 400 °C та 550 °C для зменшення або запобігання осадженню вуглецю на каталізаторі.

Було встановлено, що може бути бажаним або вигідним для роботи доменної печі додавати водень, перш за все, так званий поновлюваний або "зелений" водень у відповідному місці технологічного потоку. У цьому контексті поновлюваний або "зелений" водень є воднем (H_2), що виробляють за допомогою електролізу води з використанням електроенергії, що надходить з відновлюваних джерел, таких як вітер, сонячна енергія та гідроенергія. Як перший варіант, цей потік водню може бути доданий перед або після нагрівання потоку вуглеводневого газу в першому нагрівачі перед стадією (Б) (тобто вище за потоком або нижче за потоком по відношенню до першого нагрівача, але вище а потоком по відношенню до печі попереднього риформінгу), що призводить до більш низької конверсії метану в печі попереднього риформінгу при даній температурі порівняно з додаванням водню, але осадження вуглецю частково пригнічується, і піч попереднього риформінгу може експлуатуватися при більш високих температурах, наприклад, до 700 °C. Як другий варіант, водень може бути доданий до потоку частково реформованого сингазу, який подають до печі вторинного риформінгу, перед або після нагрівання в другому нагрівачі перед стадією (Г) (тобто вище за потоком або нижче за потоком по відношенню до другого нагрівача, але вище за потоком по відношенню до печі вторинного риформінгу), також

знижуючи осадження вуглецю. Як третій варіант, водень може бути доданий до другого потоку сингазу після печі вторинного риформінгу перед стадією (Д) для пристосування його температури до необхідного рівня температури сингазу для введення в шахту або, якщо водень попередньо нагрітий, до того ж рівня температури. Всі згадані випадки інтегрування водню у процес можуть бути об'єднані, та потік (-и) H_2, переважно, буде (-уть) попередньо нагрітий (-і). Попереднє нагрівання водню зазвичай реалізують у відповідному теплообміннику, такому як четвертий нагрівач або теплообмінник, інтегрований у лінію обробки відхідного газу іншого теплообмінника. Тому місце додавання водню також залежить від температурного рівня попереднього нагрівання.

Винахідники не тільки встановили, що за допомогою живлення печі попереднього риформінгу живильним газом з такими температурами, другий потік сингазу, що залишає розташовану нижче за потоком піч вторинного риформінгу, досягає температур приблизно від 900 до 1100 °C, ідеально приблизно 1000 °C, що є температурами, потрібними для введення сингазу в шахту доменної печі. Крім того, це уможливлює частковий риформінг (конверсію CH_4) від 2 до 25 мол. %, переважно від 5 до 18 мол. %, у печі попереднього риформінгу, полегшуючи таким чином риформінг у розташованій нижче за потоком печі вторинного риформінгу. Як уже згадувалося вище, іншою перевагою описаного у даній заявці попереднього риформінгу є те, що вищі вуглеводні усуваються/розкладаються за відносно низьких температур, зменшуючи таким чином ризик осадження сажі/твердих опадів вуглецю у печі вторинного риформінгу або у будь-яких проміжних каналах, нагрівачах тощо. Дійсно, вищі вуглеводні мають тенденцію до термічних реакцій, що призводять до ненасичених компонентів та вуглецю, перш за все, коли вони нагріті до відносно високих температур, таких як між 700 та 1000 °C, тобто температур, виміряних у печі вторинного риформінгу. Іншими словами, даний спосіб і установка доменної печі можуть, таким чином, використовувати великий діапазон джерел вуглеводнів як вуглеводневий газ. Використання частково реформованого газу, в якому вищі вуглеводні були конвертовані, уможливлює нагрівання до більш високих температур у другому нагрівачі та печі вторинного риформінгу без, або принаймні зі значно меншим, небажаним осадженням вуглецю. Для подальшого зменшення відкладень вуглецю (так званих ниткоподібних кристалів вуглецю) в печі вторинного риформінгу до нагрітого потоку живлення вуглецем можуть бути додані невеликі, добре контрольовані кількості H_2S перед піччю вторинного риформінгу для пасивування або стабілізації каталізатора, наприклад нікелевого каталізатора, таким чином сильно зменшуючи відкладення вуглецю на каталізаторі.

Каталізаторами для генерування сингазу зазвичай є метали VIII групи, такі як родій, платина, паладій, рутеній, кобальт, нікель та іридій, які нанесені на оксидні підкладки або які використовують без підкладки. Головними показниками для вибору каталізатора у зв'язку з цим є швидкість конверсії, вибірковість, термічна стабільність, запобігання утворенню вуглецю та, звичайно, вартість. Наведені вище параметри залежать від умов живлення та реакції. Використання печі попереднього риформінгу та печі вторинного риформінгу надає можливість використання двох різних каталізаторів відповідно до різних умов риформінгу. Внаслідок цього може бути знижена вартість каталізатора та досягнуті більш тривалі терміни служби дорожчого каталізатора у печі вторинного риформінгу.

Крім того, потенційні сірчисті компоненти, H_2S та інші, такі як меркаптан і тіоефірні сполуки, що є присутніми у вуглеводневому газі, будуть осаджуватися на каталізаторі печі попереднього риформінгу, захищаючи таким чином каталізатор у розташованій нижче за потоком печі вторинного риформінгу від отруєння сіркою.

Частковий риформінг на стадії (Б) може бути виконаний у багатьох відомих реакторах риформінгу, виконаних для парового риформінгу. Однак, переважно, частковий риформінг на стадії (Б) здійснюють у печі риформінгу теплообмінного типу як печі попереднього риформінгу. Будучи як такий ендотермічною реакцією, паровий риформінг вуглеводнів потребує значного введення тепла для одержання необхідної конверсії у водень та монооксид вуглецю. У звичайних печах парового риформінгу теплопередача відбувається за допомогою випромінювання, у той час як у печах риформінгу теплообмінного типу значна частина теплопередачі відбувається за рахунок конвекції з гарячим відхідним газом або гарячим технологічним газом (як буде далі пояснено), за допомогою чого теплова ефективність може бути підвищена у порівнянні з випромінюванням. На додаток до їх високої теплової ефективності теплообмінні печі риформінгу дуже компактні.

У переважних варіантах здійснення перший нагрівач і другий нагрівач виконані у вигляді теплообмінників, що використовують відхідне тепло, вироблене нижче за потоком у способі за допомогою теплової інтеграції. Переважно, (залишкове) тепло з відхідного/вихлопного газу другого теплообмінника направляють назад в якості нагрівального середовища, що підлягає використанню (у так званому гідродинамічному нагрівальному з'єднанні) при нагріванні розташованого вище за потоком першого нагрівача. Отже, в особливо переважних варіантах здійснення даного винаходу відхідне/відпрацьоване тепло зі стадій нижче за потоком використовують вище за потоком в протиточному теплообміні (отже, напрямок гідродинамічного нагрівального з'єднання протилежний напрямку гідродинамічного з'єднання технологічних потоків), переважно, в теплообмінниках і в печі попереднього риформінгу теплообмінного типу, підвищуючи таким чином ефективність способу. Терміни "вище за потоком" та "нижче за потоком" в даному контексті завжди відносяться до напрямку потоків реагентів і продуктів, що беруть участь у виробництві сингазу, (технологічний потік), а не до напрямку протиточного нагрівального середовища (гідродинамічного нагрівального з'єднання).

Піч вторинного риформінгу на стадії (Г) може бути так званою піччю вторинного сухого риформінгу або піччю вторинного автотермічного риформінгу.

У перших варіантах піч вторинного риформінгу є піччю змішаного сухого та парового риформінгу, для спрощення і згідно із загальним розумінням у даному документі званою просто піччю вторинного сухого риформінгу. Головними реакціями у печі вторинного сухого риформінгу є ендотермічні реакції сухого риформінгу у присутності CO_2, тобто $CH_4+CO_2=2CO+2H_2O$ та парового риформінгу у присутності пари, тобто $CH_4+H_2O=CO+3H_2$.

У таких варіантах піч вторинного сухого риформінгу зазвичай потребує підведення тепла, щоб зробити можливою конверсію потоку живлення вуглецем у потік придатного для використання у доменній печі сингазу.

Тому потік живлення вуглецем після стадії (В) нагрівають у другому нагрівачі до відповідних температур, причому такі температури зазвичай знаходяться між 500 °С та 800 °С, переважно між 600 °С та 750 °С, більш переважно між 850 °С та 700 °С.

Крім того, стадія (Г) також включає в себе нагрівання печі сухого вторинного риформінгу за допомогою відповідних засобів, таких як пальник, що спалює горючий газ, але більш переважно за допомогою спалювання другого потоку доменного газу в пальнику за присутності повітря, збагаченого киснем повітря або навіть кисню, одержуючи за рахунок цього також гарячий відхідний газ. Використання збагаченого киснем повітря або кисню для спалювання другого потоку доменного газу можливе у комбінації з рециркулюваним для регулювання температури полум'я відхідним газом, особливо переважно, якщо одержуваний відхідний газ також (частково) подають у піч вторинного сухого риформінгу як додаткове джерело CO_2, що також знижує вміст N_2 в одержуваному другому потоці сингазу. У цьому контексті "збагачене киснем повітря" означає, що газоподібний кисень (O_2) додають до повітря для підвищення частки кисню в одержуваній збагаченій киснем суміші до значень від 23 до 85 % об., переважно від 60 до 75 % об.

Використання чистого кисню або збагаченого киснем повітря призводить до низьких концентрацій азоту, забезпечуючи переваги також для установки захоплення вуглецю.

На додаток до згаданої вище протиточної теплової інтеграції використання печі сухого риформінгу в якості печі вторинного риформінгу (печі вторинного сухого риформінгу) дозволяє рекуперувати (залишкове) тепло із самої цієї нагрітої печі вторинного сухого риформінгу і тепло відхідного газу її пальників для використання його для нагрівання розташованого вище за потоком другого нагрівача, переважно, у комбінації з вже описаним протиточним перенесенням тепла до печі попереднього риформінгу та першого нагрівача, якщо вони виконані у вигляді теплообмінників. Відтак, тепло з гарячого відхідного газу використовують, переважно, для нагрівання розташованого вище за потоком другого нагрівача, печі попереднього риформінгу та/або першого нагрівача, переважно, послідовно у такому порядку: розташованого вище за потоком другого нагрівача, печі попереднього риформінгу, та першого нагрівача.

Деякими перевагами та вигодами цих перших варіантів є:

- завдяки печі попереднього риформінгу з приблизно 2-25 % конверсією метану (еквівалент), вища енергетична ефективність, ніж у відповідного процесу без печі попереднього риформінгу,
- оскільки доменний газ у піч попереднього риформінгу не додають, виходить загальне нижче падіння тиску,
- теплообмінники та піч попереднього риформінгу є дешевим обладнанням,
- поділ попереднього риформінгу, нагрівання та вторинного сухого риформінгу дозволяє більш просто розробляти та експлуатувати кожну стадію щодо осадження вуглецю, отруєння каталізатора, і це перш за все також беручи до уваги зміну складу доменного газу як функції роботи доменної печі.

У других варіантах вторинний риформінг на стадії (Г) здійснюють у печі автотермічного риформінгу, також відомої як ATR, яку у цій заявці називають піччю вторинного автотермічного риформінгу, у присутності відповідних кількостей кисню. Автотермічний риформінг поєднує реакції парового та сухого риформінгу та окислення палива в одному пристрої, причому екзотермічне окислення забезпечує тепло для ендотермічних реакцій риформінгу.

У такій конфігурації, що включає ATR в якості печі вторинного риформінгу, тобто печі вторинного автотермічного риформінгу, стадія попереднього риформінгу призводить до значного зменшення потреби в енергії для вторинного риформінгу, через це також знижуючи витрату кисню, що в свою чергу допомагає значно підвищити відновлювальний потенціал (другого потоку) виробленого в печі вторинного автотермічного риформінгу сингазу. У зв'язку з цим відновлювальний потенціал визначається як молярне співвідношення $(CO+H_2)/(CO_2+H_2O)$.

Температура потоку живлення вуглецем після стадії (В) відповідно до вимог регулюється та буде зазвичай становити між 750 °С та 950 °С, переважно між 800 °С та 900 °С. Відповідно, стадія (Г) додатково включає нагрівання другого нагрівача за допомогою спалювання відповідного газоподібного палива або, переважно, за допомогою спалювання другого потоку доменного газу з повітрям або киснем у пальнику, співвіднесеним з другим нагрівачем. Знову, як згадано вище в контексті інших варіантів, вироблений за допомогою спалювання у пальнику відхідний газ може (частково) подаватися у піч вторинного автотермічного риформінгу в якості додаткового джерела CO_2.

Деякими перевагами та вигодами цих других варіантів є:

- завдяки печі попереднього риформінгу з приблизно 2-25 % конверсією метану (еквівалент) вищий відновлювальний потенціал сингазу, ніж тільки з піччю вторинного ATR риформінгу,
- тоді вищий потенціал відновлення CO_2 тільки з піччю вторинного ATR риформінгу внаслідок підвищеного використання доменного газу,
- нижча потреба у O_2 ніж тільки з піччю вторинного ATR риформінгу,
- поділ попереднього риформінгу, нагрівання та вторинного риформінгу дозволяє більш просто розробляти та експлуатувати кожну стадію щодо осадження вуглецю, отруєння каталізатора, і це перш за все також беручи до уваги зміну складу доменного газу як функції роботи доменної печі.

Додатково, третій потік доменного газу може, переважно, подаватися до печі попереднього риформінгу на стадії (Б), переважно після того, як третій потік доменного газу був нагрітий, наприклад, у першому нагрівачі та/або підданий стадії охолодження газу та/або очищення, переважно стадії видалення пари, стадії видалення пилу, стадії видалення металів, стадії видалення HCl та/або стадії видалення сірчистих компонентів.

Було встановлено, що може бути бажаним або вигідним для роботи доменної печі додавати водень, так званий поновлюваний або "зелений" водень, у відповідному місці технологічного потоку. У разі використання печі сухого риформінгу в якості печі вторинного риформінгу (печі вторинного сухого риформінгу), водень, переважно, додають до потоку частково реформованого сингазу, до першого потоку доменного газу та/або до нагрітого потоку живлення вуглецем перед стадією (Г). У випадку печі автотермічного риформінгу в якості печі вторинного

риформінгу (печі вторинного автотермічного риформінгу), водень, найбільш переважно, додають до другого потоку сингазу перед стадією (Д). У цьому контексті поновлюваний або "зелений" водень є воднем (H_2), що виробляють за допомогою електролізу води з використанням електроенергії, що надходить з відновлюваних джерел, таких як вітер, сонячна енергія та гідроенергія.

У разі інтегрування водню у процес, він переважно буде попередньо нагріватися. Попереднє нагрівання водню зазвичай реалізують у відповідних теплообмінниках, таких як четвертий теплообмінник або теплообмінник, який в ідеалі інтегрують у технологічну лінію відхідного газу інших теплообмінників.

Перед направленням в димову трубу нагрівальне середовище або відхідний газ, що наприклад виходить з першого нагрівача, все ще містить теплову енергію, яка може бути використана в цьому способі і в установці доменної печі. У переважних варіантах здійснення потік нагрівального середовища або відхідний газ проходить у попередній нагрівач для попереднього нагрівання першого, другого та/або третього потоку доменного газу, повітря, збагаченого киснем повітря або кисню для використання в пальнику; та/або потоку (-ів) водню (в останньому випадку попередній нагрівач є четвертим згаданим вище нагрівачем).

Альтернативно або додатково, потік нагрівального середовища або відхідний газ факультативно додатково піддають одній або більше обробкам випуску, спрямованим, наприклад, на подальше зниження CO_2 сліду цього способу. Це може бути досягнуто за допомогою захоплення та утилізації вуглецю (CCU), наприклад, за допомогою використання відхідного газу (або його частини) у печі вторинного риформінгу, як описано вище, як такого або після обробки в установці видалення CO_2 з використанням адсорбції з перепадом тиску (PSA), адсорбції з перепадом вакууму (VSA) або адсорбції з перепадом вакууму та тиску (VPSA), обробки аміном (так званого амінового очищення), в яких одержують збагачений CO_2 потік і збіднений CO_2 потік, причому останній направляють у димову трубу. Альтернативно, зниження CO_2 сліду може бути досягнуто за допомогою захоплення вуглецю та зберігання (CCS), причому CO_2 захоплюють як у випадку CCU, але після цього зберігають так, що він не надходить в атмосферу, а зазвичай у підземну геологічну формацію. Описаний раніше спосіб є особливо цікавим, якщо кисень або збагачене киснем повітря використовують в якості кисню для спалювання для пальника внаслідок більш низької концентрації азоту у відхідному газі.

В особливо переважних варіантах здійснення одержаний на стадії (Г) потік сингазу має хімічний склад, що задовольняє наступним обмеженням:

- CH_4 < 5 % об. та
- $(CO+H_2)/(H_2O+CO_2)$ > 7.

Вираз "у гідродинамічному з'єднанні" означає, що два пристрої з'єднані каналами або трубами так, що текуче середовище, наприклад газ, може текти від одного пристрою до іншого. Як вже йшлося вище, вираз "у гідродинамічному нагрівальному з'єднанні" означає, що два пристрої з'єднані за допомогою каналів або труб так, що нагрівальне середовище, наприклад газ, може текти від одного пристрою до іншого. Напрямок потоку у гідродинамічному нагрівальному з'єднанні для теплової інтеграції протилежний напрямку гідродинамічного з'єднання, що означає, що тепловий потік знаходиться у протиточному потоці по відношенню до технологічних потоків. Ці вирази включають засоби для зміни цього потоку, наприклад клапани або вентилятори для регулювання масової витрати, компресори для регулювання тиску і т.д., а також керуючі елементи, такі як датчики, виконавчі механізми і т.д., необхідні або бажані для відповідного керування роботою доменної печі загалом або роботою кожного з елементів і установці доменної печі.

Вираз "вуглеводневий газ" у контексті даного винаходу означає будь-який вуглеводень, що має до десяти атомів вуглецю на молекулу, переважно, до шести атомів вуглецю, який перебуває в газоподібному стані при температурах першого нагрівача, тобто має температуру кипіння нижче 200 °C, переважно нижче 100 °C. Таким чином, такий вуглеводневий газ включає природний газ, тобто існуючу в природі суміш вуглеводневих газів викопного походження, що складається головним чином з метану та включає змінні кількості інших вищих алканів, а також газів з подібними вуглеводневими компонентами, такими як лігроїн, наприклад, легкий лігроїн або навіть фракції важкого лігроїну, біогаз, коксовий газ тощо.

Вираз "потік пари", що використовується тут, означає потік, що містить пару, тобто газоподібну воду, у значних кількостях, наприклад, зазвичай більш ніж 50 моль%, переважно більш ніж 80 моль%, найбільш переважно більш ніж 90 моль%. Такий потік пари може також містити інертні компоненти, такі як N_2, а також невеликі кількості газоподібних компонентів, таких як CO_2, CO або H_2. Однак, переважно, потік пари не містить більш ніж 10 % N_2.

"Живлення шахти", "живлення шахти доменної печі" або "газопідведення у шахті" мають на увазі введення матеріалу вище рівня гарячого дуття (фурми), тобто вище за заплечики доменної печі, переважно в зоні відновлення газ-тверде тіло залізної руди вище когезійної зони.

Вираз "сухий риформінг" у контексті даного винаходу включає не тільки реакцію метану з CO_2, але й імовірніше реакцію метану з парою, що залишається у сингазі, який виходить з печі попередньому риформінгу, та в специфічному вмісті пари у доменному газі.

"Приблизно" у цьому контексті означає, що дане цифрове значення перекриває діапазон значень від -10 % до + 10 % цифрового значення, переважно діапазон від -5 % до +5 % цифрового значення.

Стислий опис креслень

Переважні варіанти винаходу далі будуть описані в якості прикладу з посиланням на відповідні креслення, на яких:

Фіг. 1 є схематичним зображенням технологічного процесу здійснення першого варіанту установки доменної печі, виконаної для забезпечення здійснення даного способу експлуатації доменної печі, та

Фіг. 2 є схематичним зображенням технологічного процесу здійснення другого варіанту установки доменної печі, виконаної для забезпечення здійснення даного способу експлуатації доменної печі.

Інші подробиці та переваги даного винаходу будуть зрозумілі з наступного докладного опису декількох не обмежувальних варіантів здійснення з посиланням на додані креслення.

Опис переважних варіантів здійснення

Вимоги до сингазу для його використання в доменній печі відрізняються від вимог щодо застосування в інших галузях промисловості.

Головними вимогами для використання сингазу в доменній печі є:

Ступінь відновлення та рівень температури сингазу:

В інших галузях промисловості сингаз зазвичай виробляють і потім охолоджують для відокремлення надлишку пари з сингазу. У зв'язку з цим лише охолоджений газ використовують у розташованих нижче за потоком процесах. Тому в існуючих промислових застосуваннях, крім сталеливарної промисловості, високий ступінь відновлення не є важливим. Однак у сталеливарній промисловості високий ступінь відновлення, переважно вище 7, є переважним і важливим, оскільки ступінь відновлення визначається як: $(cCO+cH_2)/cH_2O+cCO_2)$.

Крім того, високі температури сингазу сприятливо сумісні з рівнем температури, необхідним для введення в шахту, щоб зробити можливою максимальну термічну ефективність. Таким чином, температура повинна бути близько 900-1100 °C, щоб уможливити введення в шахту над когезійною зоною доменної печі.

Співвідношення H_2/CO

В інших галузях промисловості, за винятком сталеливарної промисловості, сингаз використовують для специфічних застосувань, таких як виробництво чистого водню, аміаку або виробництва інших хімічних компонентів. У зв'язку з цим зазвичай є необхідним специфічне співвідношення водню до CO.

У порівнянні з цим, метою використання сингазу в доменній печі є відновлення руди, що досягається за допомогою обох відновлювальних компонентів, CO та водню. Хоча існує різниця між відновленням руди за допомогою CO або водню, ця різниця є відносно несуттєвою, враховуючи, що сингаз є лише частиною відновлювального газу, що використовують в доменній печі.

Рівень тиску

У той час як в інших галузях промисловості рівень тиску в печах риформінгу відносно високий, здебільшого вище 20 бар абсолютних або навіть вище 40 бар абсолютних, у застосуванні до доменної печі необхідний рівень тиску становить лише 2-6 бар абсолютних. Це має істотний вплив на робочі умови та обмеження для обладнання для риформінгу, такі як утворення вуглецю та рівноважна конверсія. У той час як нижчий рівень тиску сприятиме більш високій конверсії метану при тому ж самому рівні температури, це, на жаль, також сприяє утворенню вуглецю, внаслідок чого використання печі попереднього риформінгу є особливо переважним при виробництві сингазу для його використання у доменній печі.

Викиди CO_2

Кокс є основним джерелом енергії при виробництві чавуну в доменній печі. З економічної та пов'язаної з CO_2 точки зору це найменш сприятливе джерело енергії. Широко використовують заміна коксу іншими джерелами енергії, що в більшості випадків вводять на рівні фурм. У силу міркувань вартості головним чином вводять порошкоподібне вугілля, однак у країнах з низькою ціною природного газу використовують це джерело енергії. Часто в доменну піч вводять залишки на кшталт пластмасових відходів.

Ці допоміжні палива можуть мати позитивний вплив на викиди CO_2 з доменної печі при виробництві сталі, тим часом їх використання обмежується з технологічних причин і дуже часто ці обмеження в даний час вже досягнуті. Доменна піч виробляє доменний газ (BFG), що містить приблизно до 40 % енергії, що підводять до доменної печі. Цей газ зазвичай використовують для покриття внутрішніх потреб у теплі сталеливарного заводу, а також вироблення електроенергії. З метою зменшення CO_2 сліду заснованого на доменній печі виробництва сталі важливою стратегією є, таким чином, використання такого BFG для металургійних цілей та застосування інших енергій з малими викидами CO_2, таких як зелена електрична енергія для покриття решти потреб у енергії сталеливарного заводу.

Тому виробництво синтетичного газу, крім використання вуглеводню, що утворює малі кількості CO_2, має також включати наскільки можливо доменний газ для поліпшення потенціалу зниження викидів CO_2 при виробництві чавуну в доменній печі.

Додавання водню

Якщо бажано або вигідно, до способу може бути доданий потік водню, переважно поновлюваного водню, перш за все, перед піччю попереднього риформінгу та/або піччю вторинного риформінгу зі зменшенням осадження вуглецю, у зв'язку з цим потік водню може бути доданий перед або після першого нагрівача або перед або після другого нагрівача. Перед додаванням може бути вигідним нагрівати потік водню, переважно, з використанням іншого теплообмінника, встановленого у гідродинамічних нагрівальних з'єднаннях каналів, що інтегрують тепло, наприклад, у місцях А (якщо може бути застосовано), Б, В або Г.

Забруднення

В силу використання вугілля та коксу, а також часто дешевих вторинних палив, таких як пластмасові відходи або смола для використання в доменній печі, типові та шкідливі хімічні компоненти, такі як молекули, що містять хлор та сірку, є частиною доменного газу. При використанні цього газу для виробництва сингазу ці компоненти можуть призводити до швидкого отруєння каталізатора риформінгу, якщо його належним чином не піддають обробці.

Риформінг та допоміжні технології для виробництва сингазу:

Реакції реформінгу

Риформінг вуглеводневого газу, такий як риформінг природного газу, в принципі може бути виконаний за допомогою наступних реакцій:

Часткове окислення у присутності пари: $CH_4+1/2O_2=CO+H_2$

Ця реакція є сильно екзотермічною, та виділяється велика кількість енергії.

Паровий риформінг у присутності пари: $CH_4+H_2O=CO+3H_2O$

Сухий риформінг у присутності CO_2: $CH_4+CO_2=2CO+2H_2$

Ці дві останні реакції є сильно ендотермічними та потребують багато тепла.

Технології риформінгу та їх адаптація до введення в шахту доменної печі

Для технологій ATR риформінгу термодинамічна рівновага при необхідному найкращому відновлювальному потенціалі газу призводить до температури сингазу, яка ще надто низька для його подачі в шахту. Фактично підвищення температури додатково призводить до більш високих вимог до кисню та до зниженого відновлювального потенціалу сингазу, що не є сприятливим для призначеного використання.

Попереднє нагрівання газу, що подається

Винахідники встановили, що для поліпшення ситуації може бути застосоване попереднє нагрівання газу, який вводять. Термодинамічний склад сингазу при його оптимумі може бути одержаний за допомогою попереднього нагрівання газів, що подають, до температури між 400 та 550 °C. Дійсно, з таким попереднім нагріванням може бути не тільки збільшений відновлювальний потенціал сингазу, але також може бути досягнута необхідна температура сингазу від приблизно 900 до 1100 °C.

Попередній риформінг:

При використанні попередньо реформованого газу або частково реформованого газу, що був реформований за середніх температур до 600 °C, переважно між 430 та 500 °C, і найбільш переважно між 450 та 480 °C, відновлювальний потенціал газу з печі вторинного риформінгу може бути додатково поліпшений. Конверсій метану приблизно від 2 до 18 % можна досягти, полегшуючи необхідну роботу для печі вторинного риформінгу. Іншими перевагами є видалення вищих вуглеводнів перед входом у піч вторинного риформінгу та, таким чином, зменшення можливого утворення сажі. На додаток каталізатор в реакторі попереднього риформінгу зазвичай є типом каталізатора з великою поверхнею, який може витримувати більш високі концентрації отрути, ніж каталізатор, що використовують в печі вторинного риформінгу. Крім того, сірка осаджуватиметься на каталізаторі печі попереднього риформінгу, захищаючи таким чином каталізатор печі вторинного риформінгу від отруєння сіркою.

При використанні технології ATR в якості печі вторинного риформінгу (печі вторинного автотермічного риформінгу), попередній риформінг метану призводить до значного зниження енергетичної потреби для цієї другої стадії процесу, дозволяючи знизити витрату кисню. Це, у свою чергу, значно підвищує відновлювальний потенціал синтетичного газу, що виробляють у печі вторинного автотермічного риформінгу.

Додатково, попередній риформінг буде переважно реалізований з побічним постачанням енергією. Джерелом тепла може бути спалювання доменного газу в пальнику з подальшим покращенням балансу CO_2 процесу у комбінації з виробництвом сталі.

Нагрівання частково реформованого газу

Вищі вуглеводні мають тенденцію до теплових реакцій, що призводять до ненасичених компонентів та вуглецю. Це може призводити до вуглецевих відкладень у теплообмінниках, якщо нереформований газ нагрівають до відносно високих температур, типово між 700 та 1000 °C. Використання попередньо реформованого газу, в якому вищі вуглеводні конвертовані, уможливлює нагрівання до високих температур.

При використанні технології ATR в якості печі вторинного риформінгу (печі вторинного автотермічного риформінгу), висока вхідна температура попередньо реформованого газу призводить до значного зниження енергетичної потреби для цієї стадії процесу, що дозволяє значно знизити витрату кисню.

Додатково, це допомагає значно підвищити відновлювальний потенціал синтетичного газу, що виробляють у печі вторинного автотермічного риформінгу.

Додатково, попереднє нагрівання буде, переважно, реалізовано з непрямим нагріванням. Джерелом тепла може бути спалювання доменного газу, що призводить до подальшого покращення балансу CO_2 щодо процесу у комбінації з виробництвом сталі.

Нижче, у зв'язку з прикладеними кресленнями показані два різні варіанти способу експлуатації доменної печі та установки доменної печі згідно з винаходом з використанням або сухого риформінгу або автотермічного риформінгу в якості печі вторинного риформінгу з відповідними допоміжними технологіями.

На фіг. 1 показане здійснення першого варіанту даного способу експлуатації доменної печі, що включає введення у шахту потоку сингазу при температурах від 900 до 1100 °C, тобто близько 1000 °C та при тиску від 1 до 6 бар надлишкового тиску.

Цей потік сингазу був вироблений виходячи з природного газу (NG), факультативно очищеного від забруднень, наприклад, приблизно 100 нм^3/год., і пари, наприклад, приблизно 50 нм^3/год., які були нагріті в першому нагрівачі перед або після змішування, переважно в першому теплообміннику до температури приблизно від 400 °C до 550 °C перед частковим реформуванням у печі попереднього риформінгу, переважно в печі попереднього парового риформінгу теплообмінного типу, де від 2 до 18 % метану, що міститься в природному газі, конвертується в CO та H_2, утворюючи таким чином потік частково реформованого сингазу.

Цей потік частково реформованого сингазу потім змішують з першим потоком доменного газу, наприклад, приблизно від 300 до 400 нм^3/год. при тиску приблизно від 1,5 до 6,5 бар надлишкового тиску або перед або після його нагрівання у другому нагрівачі, переважно, при температурах від приблизно 500 до 800 °C, більш переважно приблизно від 600 °C до 700 °C, для утворення нагрітого потоку живлення вуглецем. Доменний газ зазвичай спочатку охолоджують для зменшення вмісту пари, очищають, перш за все, за допомогою видалення пилу та/або HCl та/або металевих сполук та/або сірчистих сполук. У переважних варіантах здійснення цей перший потік доменного газу спочатку попередньо нагрівають, наприклад, в одному або кількох місцях А, Б, В або Г.

Додатково, третій потік доменного газу, переважно, може бути поданий до печі попереднього риформінгу на стадії (Б), переважно, після того, як третій потік доменного газу був нагрітий в першому нагрівачі та/або підданий стадії охолодження газу та/або очищення, стадії видалення HCl та/або стадії видалення сірчистих сполук. Знов у переважних варіантах здійснення цей третій потік доменного газу може бути спочатку попередньо нагрітий, наприклад, в одному або кількох місцях А, Б, В або Г.

Основний риформінг виконують у печі вторинного риформінгу, яка в даному випадку є так званою піччю

сухого риформінгу (піччю вторинного сухого риформінгу). Необхідне для реакції сухого риформінгу тепло забезпечують за допомогою пальника, що експлуатують з другим потоком доменного газу, який залежить від температури попереднього нагрівання та складу потоку газу, наприклад, приблизно від 350 до 600 нм^3/год., як наприклад, приблизно 510 нм^3/год., з верхньої частини доменної печі. Цей пальник можуть живити повітрям, збагаченим киснем повітрям або навіть киснем, насамперед, якщо відхідний газ від пальника повторно вводять у піч сухого риформінгу в якості джерела CO_2.

Потік сингазу, що залишає піч вторинного сухого риформінгу, наприклад, приблизно від 550 до 700 нм^3/год., як наприклад, приблизно 640 нм^3/год., має температуру приблизно 1000 °C і тиск приблизно від 1 до 6 бар надлишкового тиску і після цього його прямо вводять безпосередньо у шахту доменної печі.

Переважно, залишкове тепло з печі вторинного сухого риформінгу одержують у вигляді гарячого відхідного газу як, наприклад, (частина) відхідного газу від її пальника і може бути використане для нагрівання другого теплообмінника, решту тепла в свою чергу використовують для нагрівання печі попереднього риформінгу і надалі першого теплообмінника, формуючи таким чином енергоефективний протиточний потік концепції теплової інтеграції. Залишаючи перший теплообмінник, газ може бути випущений через димову трубу або далі оброблений, наприклад, щоб зробити його придатним для захоплення та зберігання вуглецю або захоплення та утилізації вуглецю тощо. У переважних варіантах здійснення відхідний газ, що виходить з першого нагрівача, може бути пропущений через інший теплообмінник, наприклад, для попереднього нагрівання другого потоку доменного газу та/або повітря, збагаченого киснем повітря або кисню, які використовують у пальнику печі вторинного сухого риформінгу.

На фіг. 2 показано здійснення другого варіанту даного способу експлуатації доменної печі, що включає введення в шахту потоку сингазу при температурах від 900 до 1100 °C, тобто близько 1000 °C та при тиску від 1 до 6 бар надлишкового тиску.

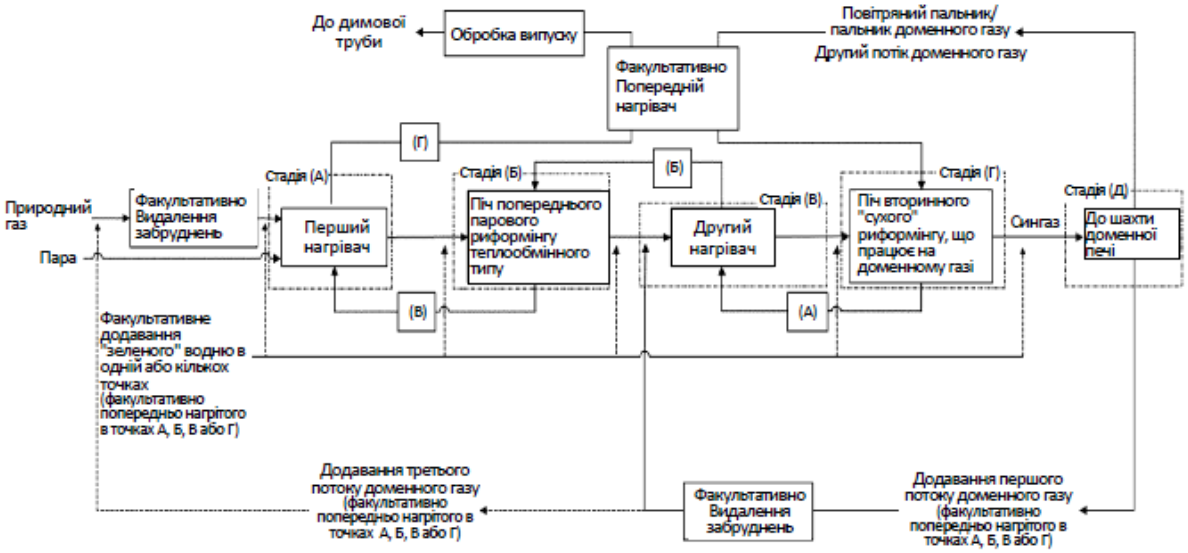
Цей потік сингазу був вироблений виходячи з природного газу (NG), факультативно очищеного від забруднень, наприклад, приблизно 100 нм^3/год., та пари, наприклад, приблизно 50 нм^3/год., які були нагріті в першому нагрівачі перед або після змішування, переважно, у першому теплообміннику до температури приблизно від 400 °C до 550 °C перед частковим реформуванням у печі попереднього риформінгу, переважно, у печі попереднього парового риформінгу теплообмінного типу, де від 2 до 25 % метану, що міститься в природному газі, конвертується в CO та H_2, утворюючи таким чином потік частково реформованого сингазу.

Цей потік частково реформованого сингазу потім змішують з першим потоком доменного газу, наприклад, приблизно 60 нм^3/год. при тиску приблизно від 1,5 до 6,5 бар надлишкового тиску або перед або після його нагрівання у другому нагрівачі, переважно, при температурах від приблизно 750 °C до 950 °C, переважно, приблизно від 800 °C до 900 °C для утворення нагрітого потоку живлення вуглецем. У переважних варіантах здійснення цей перший потік доменного газу можуть спочатку попередньо нагрівати, наприклад, в одному або декількох місцях Б, В або Г. Як описано вище, доменний газ зазвичай спочатку охолоджують та/або очищають, насамперед, за допомогою видалення пари, металів, сірчистих компонентів та/або HCl.

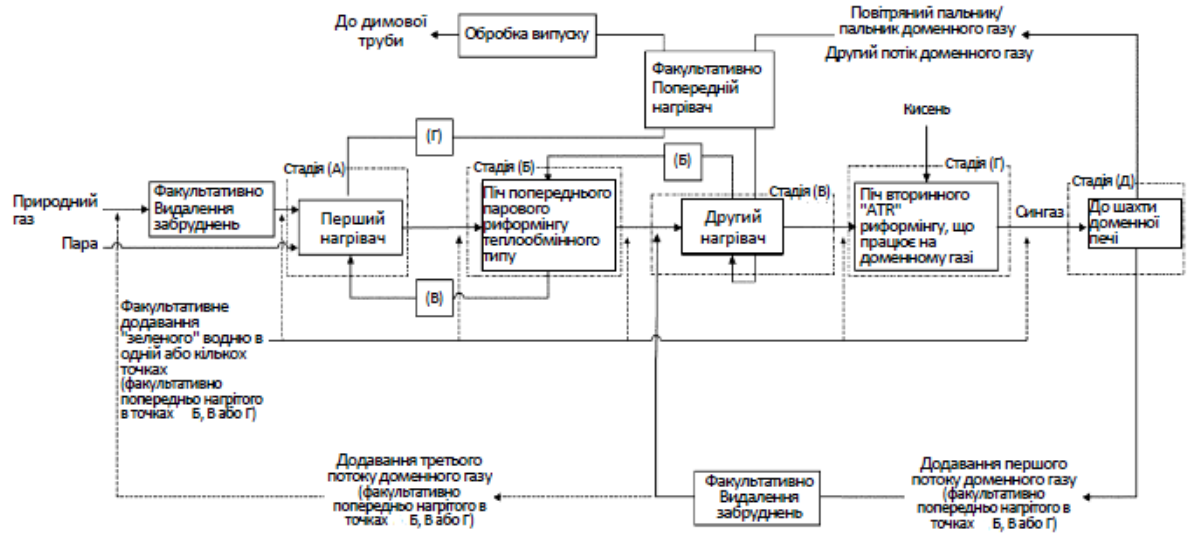
Головний риформінг виконують у печі вторинного реформінгу, яка у цьому випадку є піччю автотермічного риформінгу (піччю вторинного автотермічного риформінгу). Необхідне для другого нагрівача тепло можуть забезпечувати за допомогою приєднаного до нього пальника та експлуатувати з другим потоком доменного газу, наприклад, приблизно 230 нм^3/год. з верхньої частини доменної печі. Цей пальник можуть живити за допомогою повітря, збагаченого киснем повітря або навіть кисню, перш за все, якщо відхідний з пальника газ вводять повторно в піч вторинного автотермічного риформінгу. У печі вторинного автотермічного риформінгу кисень необхідний екзотермічної реакції окислення. Тому кисень, наприклад, приблизно 40 нм^3/год. вводять у піч автотермічного риформінгу, факультативно попередньо нагрітий, наприклад, в одному або декількох місцях Б, В або Г.

Сингаз, що залишає піч вторинного автотермічного риформінгу, наприклад, приблизно 340 нм^3/год. має температуру приблизно 1000 °C і тиск приблизно від 1 до 6 бар абсолютних і після цього його вводять безпосередньо в шахту шахтної печі.

Переважно, залишкове тепло з другого теплообмінника, що одержують у вигляді гарячого газу, наприклад відхідного газу з його пальника, можуть використовувати для нагрівання печі попереднього риформінгу, решту тепла потім у свою чергу використовують для нагрівання першого теплообмінника, формуючи таким чином енергоефективний протиточний потік концепції теплової інтеграції. Залишаючи перший теплообмінник, газ може бути випущений через димову трубу або далі оброблений, наприклад, щоб зробити його придатним для захоплення та зберігання вуглецю або захоплення та утилізації вуглецю тощо. У переважних варіантах здійснення відхідний газ, що залишає перший нагрівач, може бути пропущений через інший теплообмінник, наприклад, для попереднього нагрівання другого потоку доменного газу та/або повітря, збагаченого киснем повітря або кисню, що використовують в пальнику печі вторинного риформінгу.


До димової труби
Обробка випуску
Повітряний пальник/ пальник доменного газу
Другий потік доменного газу
Факультативно Попередній нагрівач
(Г)
(Б)
Стадія (А)
Стадія (Б)
Стадія (В)
Стадія (Г)
Стадія (Д)
Природний газ
Пара
Факультативно Видалення забруднень
Перший нагрівач
Піч попереднього парового риформінгу теплообмінного типу
Другий нагрівач
Піч вторинного "сухого" риформінгу, що працює на доменному газі
Синтез-газ
До шахти доменної печі
(В)
(А)
Факультативне додавання "зеленого" водню в одній або кількох точках (факультативно попередньо нагрітого в точках А, Б, В або Г)
Додавання третього потоку доменного газу (факультативно попередньо нагрітого в точках А, Б, В або Г)
Факультативно Видалення забруднень
Додавання першого потоку доменного газу (факультативно попередньо нагрітого в точках А, Б, В або Г)

Фіг. 1


До димової труби
Обробка випуску
Повітряний пальник/ пальник доменного газу
Другий потік доменного газу
Факультативно Попередній нагрівач
Кисень
(Г)
(Б)
Стадія (А)
Стадія (Б)
Стадія (В)
Стадія (Г)
Стадія (Д)
Природний газ
Пара
Факультативно Видалення забруднень
Перший нагрівач
Піч попереднього парового риформінгу теплообмінного типу
Другий нагрівач
Піч вторинного "ATR" риформінгу, що працює на доменному газі
Синтез-газ
До шахти доменної печі
(В)
Факультативне додавання "зеленого" водню в одній або кількох точках (факультативно попередньо нагрітого в точках Б, В або Г)
Додавання третього потоку доменного газу (факультативно попередньо нагрітого в точках Б, В або Г)
Факультативно Видалення забруднень
Додавання першого потоку доменного газу (факультативно попередньо нагрітого в точках Б, В або Г)

Фіг. 2