



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **112642** (13) **C2**

(51) МПК (2016.01)

C21B 9/00**C21B 9/04** (2006.01)**C21B 9/14** (2006.01)ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД**

(21) Номер заявки: а 2013 11222	(72) Винахідник(и): Камерон Ендрю М. (GB), Річардсон Ендрю П. (US)
(22) Дата подання заявки: 24.01.2012	(73) Власник(и): ЛІНДЕ АКЦІЄНГЕЗЕЛЛЬШАФТ, Klosterhofstr. 1, 80331 Munich, Germany (DE)
(24) Дата, з якої є чинними права на винахід: 10.10.2016	(74) Представник: Мошинська Ніна Миколаївна, реєстр. №115
(31) Номер попередньої заявки відповідно до Паризької конвенції: 13/031,941	(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою: UA 29 191 U, 10.01.2008 UA a200807891, 10.12.2009 GB 715 958 A, 22.09.1954 GB 983 499 A, 17.02.1965 FR 2 847 659 A1, 28.05.2004 WO 99/26020 A1, 27.05.1999 WO 2004/094797 A2, 04.11.2004 WO 2005/083130 A1, 09.09.2005 WO 2010/133476 A1, 25.11.2010 WO 2011/065907 A1, 03.06.2011 US 4 169 700 A, 02.10.1979 US 4 444 555 A, 24.04.1984 Ковальски В., Петерс К.-Х., Кронерт В., Кун П., Зуккер Д. Оптимизация работы горелок доменных воздухонагревателей сточки зрения увеличения сжигания оксида углерода//Черные металлы. Stahl und Eisen. № 11, 1990. С. 8-14 Van Laar R. et al. The Future of Hot Blast Stoves//Iron and Steel Technology. Technology Conference. Pittsburg, PA, pages 587-595
(32) Дата подання попередньої заявки відповідно до Паризької конвенції: 22.02.2011	
(33) Код держави-учасниці Паризької конвенції, до якої подано попередню заявку: US	
(41) Публікація відомостей про заявку: 10.01.2014, Бюл.№ 1	
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 10.10.2016, Бюл.№ 19	
(86) Номер та дата подання міжнародної заявки, поданої відповідно до Договору РСТ: PCT/US2012/022293, 24.01.2012	

(54) СПОСІБ НАГРІВАННЯ ПОВІТРОНАГРІВНИКА ДОМЕННОЇ ПЕЧІ**(57)** Реферат:

Спосіб нагрівання повітрянагрівника доменної печі за допомогою згоряння в стійкому, видимому полум'ї палива з низькою теплотворною здатністю (LHV), що становить 9 МДж/Нм³ або менше, в зоні горіння, влаштованій в камері згоряння у повітрянагрівнику, і пропускання через вогнетривкий матеріал у повітрянагрівник, тим самим нагріваючи його, при цьому паливо згоряє з окисником, що включає щонайменше 85 мас. % кисню, а димові гази рециркулюють в зону горіння, тим самим розбавляючи в ній суміш палива і окисника в достатню міру таким чином, щоб полум'я не пошкодило вогнетривкий матеріал.

UA 112642 C2

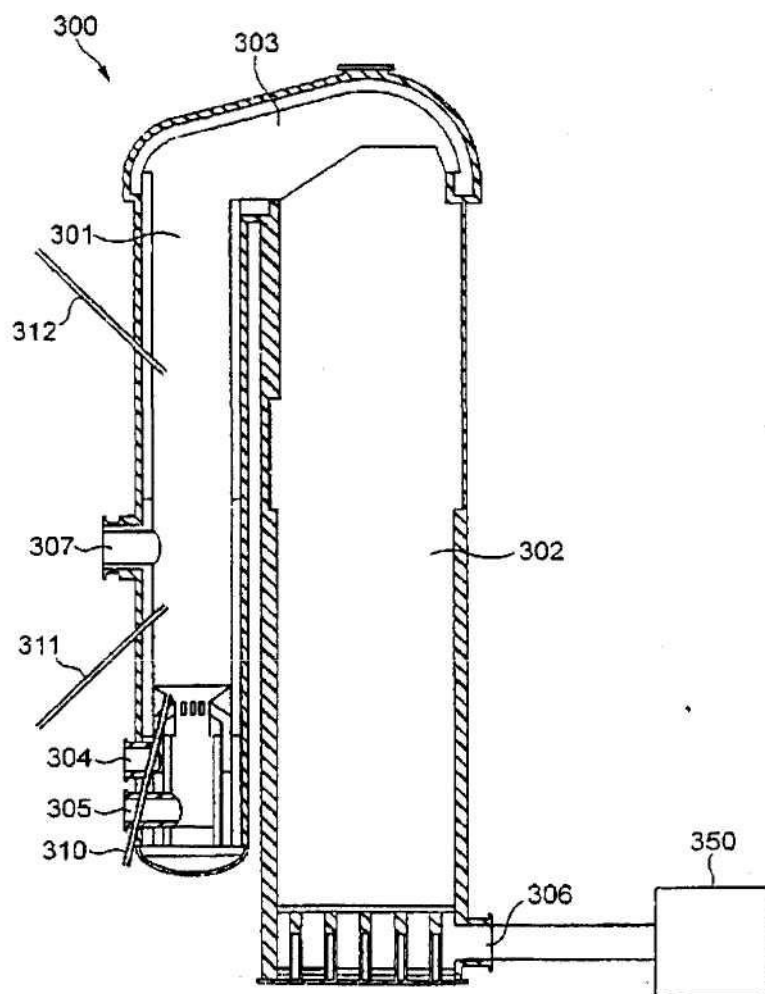


Fig. 3

Передумови створення винаходу

Даний винахід стосується способу нагрівання доменного повітрянагрівника, що використовується в доменній печі.

Повітря для горіння, що подається в доменну піч, звичайно попередньо нагрівають за допомогою повітрянагрівника, що містить вогнетривкий матеріал, який нагрівають, використовуючи пальник. Коли такий матеріал стає досить гарячим, через повітрянагрівники пропускають повітря для горіння з метою його попереднього нагрівання перед вдуванням в доменну піч. Звичайно паралельно і циклічно працюють декілька повітрянагрівників таким чином, щоб щонайменше один повітрянагрівник працював для нагрівання повітря для горіння під час нагрівання щонайменше одного повітрянагрівника.

Традиційно колошниковий газ, що виходить з доменної печі, має температуру близько 110-120 °C і містить по 20-25 % CO і CO₂. Звичайно також присутні 3-5 % H₂ і деяка кількість H₂O, однак іншим основним компонентом колошниковога газу є N₂ (звичайно 45-57 %). Такий газ є складовою частиною низькосортного палива, що має відносно низьку теплотворну здатність, і звичайно використовується для забезпечення паливом повітрянагрівників.

Колошниковий газ звичайно спалюють за допомогою паливоповітряних пальників у повітрянагрівниках. Добре відомо, що для досягнення необхідних високих температур доменного дуття, необхідних в доменній печі, потрібно збагатити колошниковий газ газом з високою теплотворною здатністю, таким як коксовий газ або природний газ. Спалювання такого додаткового палива спричиняє більший загальний об'єм викиду діоксиду вуглецю заводом і тому є небажаним.

Також відоме збагачення киснем повітря для горіння, що використовується в пальниках для ступінчастого горіння. Звичайно рівень збагачення, необхідний для зниження або усунення необхідності в додаткових видах палива з високою теплотворною здатністю, такою, що вміст кисню в кінцевому збагаченому киснем повітрі для горіння складає близько 28-30 %.

Такі способи в деяких випадках можуть сприяти виникненню пікових температур полум'я, достатньо високих для того, щоб пошкодити вогнетривкий матеріал повітрянагрівника.

Сама доменна піч являє собою високоефективний протиструминний реактор, який еволюціонував протягом багатьох років. Він наближається до меж термодинамічної ефективності. Більше того, доменна піч і її допоміжне обладнання, таке як повітрянагрівники, є найбільшими споживачами енергії на інтегрованих металургійних установках. Крім того, енергія, споживана при виробництві чавуну, є переважаючим фактором, що визначає споживання вуглецю в інтегрованому процесі виплавки сталі і, як наслідок, викиди діоксиду вуглецю. Тому бажано підвищити термічну ефективність повітрянагрівників доменних печей.

Крім згаданої вище проблеми з високими піковими температурами, дуже низькі температури полум'я або кількість тепла, що підводиться, приведуть до тривалих циклів нагрівання, що є небажаним. Іншими словами, температуру полум'я необхідно контролювати.

Розкриття винаходу

Варіанти втілення, що розкриваються, вирішують описані вище задачі і дозволяють досягнути інших переваг, як буде описано нижче.

Таким чином, варіанти втілення, що описуються, стосуються способу нагрівання повітрянагрівника доменної печі за допомогою горіння палива з низькою теплотворною здатністю (LHV), що становить 9 МДж/Нм³ або менше, в зоні горіння, в якій підтримують стійке, видиме полум'я, що забезпечується в камері згоряння у повітрянагрівнику, і пропускання через неї димових газів, тим самим нагріваючи вогнетривкий матеріал у повітрянагрівнику, який відрізняється тим, що паливо згоряє з окисником, що містить щонайменше 85 % кисню, при цьому димові гази рециркулюють в зону горіння для того, щоб в достатній мірі розбавити в ній суміш палива і окисника таким чином, щоб полум'я не пошкодило вогнетривкий матеріал.

Короткий опис креслень

Далі винахід буде описаний детально з посиланням на ілюстративні варіанти втілення даного винаходу і на прикладені креслення, на яких:

Фіг. 1 являє собою спрощену ілюстрацію доменної печі і трьох повітрянагрівників на традиційному металургійному заводі;

Фіг. 2 являє собою вигляд в розрізі, що ілюструє традиційний повітрянагрівник сучасного типу із зовнішньою камерою згоряння;

Фіг. 3 являє собою вигляд в розрізі повітрянагрівника з додатковими фурмами згідно з варіантами втілення, що описуються;

Фіг. 4 являє собою докладний вигляд в розрізі повітрянагрівника з киснепаливним пальником згідно з варіантами втілення, що описуються;

Фіг. 5 являє собою вигляд в розрізі повітрянагрівника з рециркулюванням димового газу згідно з варіантами втілення, що описуються;

Фіг. 6 являє собою докладний вигляд в розрізі повітрянагрівника з ежекторною фурмою згідно з варіантами втілення, що описуються;

5 Фіг. 7 являє собою графік, що ілюструє аксіальний температурний профіль горіння в камері згоряння повітрянагрівника пальника, (а) який працює традиційним способом з підтриманням горіння повітрям і без рециркуляції димового газу і (b) працює згідно з варіантами втілення, що описуються;

10 Фіг. 8 являє собою такий же графік, як і Фіг. 7, але який показує аксіальний швидкісний профіль для таких же двох варіантів горіння; і

Фіг. 9 являє собою такий же графік, як і Фіг. 7, але який показує профіль аксіальної концентрації оксиду вуглецю для таких же двох варіантів горіння.

Докладний опис

15 Фіг. 1 ілюструє розташування доменної печі 120 і трьох повітрянагрівників 100 на металургійному заводі. У результаті роботи доменної печі 120 отримують доменний колошниковий газ, який подають, за допомогою контролюючого подачу палива пристрою 110, в кожний повітрянагрівник 100 і використовують як паливо для нагрівання повітрянагрівника 100, що описується. Колошниковий газ спалюють з окисником у вигляді повітря, що подається контролюючим подачу повітря пристроєм 130.

20 Кожний повітрянагрівник 100 включає вогнетривкий матеріал у вигляді керамічних цеглин або т. п., який спочатку нагрівають, а потім використовують для нагрівання повітря, що вдувається, яке подають в доменну піч.

У режимі нагрівання вогнетривкого матеріалу (подача газу відкрита) колошниковий газ спалюють у повітрянагрівнику 100, а димові гази подають в пристрій 150 для обробки відхідного газу, що при необхідності містить стадії уловлювання вуглецю.

25 У режимі нагрівання повітря дуття (вдування повітря активне) повітря подають через вогнетривкий матеріал в протилежному напрямку, а потім в доменну піч 120.

Повітрянагрівники 100 працюють циклічно, тому в будь-який час щонайменше один повітрянагрівник працює на повітрі, що вдувається, а інші повітрянагрівники працюють на газі.

30 Фіг. 2 являє собою вигляд в розрізі традиційного повітрянагрівника 100 сучасного типу. Повітрянагрівник 100 включає зовнішню камеру 101 згоряння, вогнетривкий матеріал 102 і купол 103. При роботі на газі важливо, щоб температура купола 103 не досягала дуже високих значень, оскільки в такому випадку виникає небезпека пошкодження повітрянагрівника 100. Потрібно пам'ятати про те, що існують повітрянагрівники з внутрішніми камерами згоряння і що 35 даний винахід в рівній мірі стосується також роботи таких повітрянагрівників.

При роботі на газі колошниковий газ і повітря подають в зону горіння камери 101 згоряння, в якій відбувається горіння за допомогою повітряного пальника 108. Пальник 108 включає вхідний отвір 105 для палива і вхідний отвір 104 для повітря. Потім гарячі димові гази підіймаються у вигляді потоку вгору в камері 101, повз куполи 103 і опускаються вниз через вогнетривкий 40 матеріал 102, таким чином нагріваючи його. При виході з отвору 106 температура димових газів звичайно становить приблизно 200-350 °C.

Після досягнення заданої температури вогнетривкого матеріалу режим перемикається на дуття. Потім повітря надходить через отвір 106, проходить у вигляді потоку через гарячий вогнетривкий матеріал 102, через купол 103 і камеру 101 згоряння і виходить назовні через 45 випускний отвір 107. У цей момент температура повітря, що вдувається, звичайно становить 1100-1200 °C.

У контексті даного винаходу переважним є нагрівання повітрянагрівника колошниковим газом доменної печі, як описано вище. Більше того, переважним є використання колошникового газу з доменної печі, в яку повітря, що вдувається, надходить з повітрянагрівника. Це дозволяє 50 встановлювати повітрянагрівник поблизу від доменної печі, економити енергію і приводить до зниження загальних викидів із заводу.

Однак, потрібно зазначити, що даний винахід з однаковим успіхом застосовний до повітрянагрівників, що нагріваються іншими видами низькосортного палива. Як приклад типові хімічні складі (процентні величини) і значення низької теплотворної здатності (LHV) вказані в 55 таблицях I і II, відповідно, для доменного колошникового газу і конвертерного відхідного газу.

Таблиця 1

	N ₂	O ₂	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C _m H _n	H ₂ O
Колошниковий газ	52,5	0,55	2,3	23,5	20	-	-	1,15
Відхідний газ	17,2	0,1	2,5	64,5	15,6	-	-	0,1

Таблиця 2

	LHV (МДж/Нм ³)	LVH (МДж/кг)
Колошниковий газ	3,2	2,4
Відхідний газ	6,3	8,4

Згідно з даним винаходом повітрянагрівник нагрівають газоподібним паливом, величина LHV якого складає не більше ніж 9 МДж/Нм³. Використання такого низькосортного палива принесе максимальну вигоду з можливих економічних переваг, що забезпечуються даним винаходом. Таке паливо може включати деяку кількість іншого, більш високосортного палива за умови, що величина LHV суміші дорівнює або менша ніж 9 МДж/Нм³. Однак для мінімізації вартості і викидів переважно не додавати високосортні види палива до згоряння.

Згідно з даним винаходом таке низькосортне паливо використовують для нагрівання повітрянагрівника, спалюючи його, не з повітрям або дещо збагаченим киснем повітрям, а окисником, що включає щонайменше 85 мас. %, переважно - щонайменше 95 мас. % кисню, при цьому окисник найбільш переважно являє собою промислово-чистий кисень, вміст кисню в якому складає по суті 100 %.

Це підвищить ефективність палива, оскільки відсутня необхідність нагрівання азотного баласту, присутнього в повітрі. Більше того, в результаті зменшення азотного баласту в продуктах згоряння можуть бути досягнуті потрібні температури полум'я без необхідності доповнювати низькосортний паливний газ висококалорійний видами палива. Знижена потреба в енергії полегшить підвищене вироблення електроенергії і/або зменшить потребу в газі, що подається, поліпшуючи таким чином керування витратою палива.

Звичайно використання окисника з таким високим вмістом кисню забезпечує отримання пікових температур, достатньо високих для того, щоб пошкодити купол і вогнетривкий матеріал повітрянагрівника.

Однак, даний тип окисника може бути використаний таким чином, щоб рециркулювати димові гази повітрянагрівника в зону горіння в такій мірі, щоб суміш палива і окисника в ній виявилася досить розбавленою в зоні горіння для того, щоб сформувати стабільне, видиме полум'я при температурах, які не викликають пошкодження купола і вогнетривкого матеріалу.

У даному описі фраза "рециркулювання димових газів в зону горіння" стосується димових газів, що знаходяться за межами зони горіння і рециркульованих назад в зону горіння. Такі димові гази можуть спочатку знаходитися всередині самої камери згоряння, але за межами частини камери згоряння, зайнятої зоною, в якій в основному відбувається горіння ("зона горіння"). Таким чином, в цьому випадку димові гази фактично рециркулюють всередині камери згоряння. Як альтернатива, такі димові гази можуть бути рециркульовані зовні камери згоряння назад в зону горіння.

Як детально описано далі, розбавлення реагентів може бути досягнуте або в результаті створення сильної турбулентності всередині камери згоряння з використанням високошвидкісного продування киснем, можливо, із застосуванням ступінчастої схеми горіння, і/або рециркулювання димових газів з повітрянагрівника назад в зону горіння.

Згідно з даним винаходом можуть бути досягнуті температури полум'я з достатньо низькими піками для того, щоб не пошкодити вогнетривкий матеріал повітрянагрівника.

Крім того, при використанні окисника з високим вмістом кисню для горіння низькосортних видів палива, таких як доменний колошниковий газ, вміст CO₂ в димових газах істотно підвищується в порівнянні з використанням повітря або дещо збагаченого киснем повітря як окисника. Оскільки традиційні методи уловлювання вуглецю істотно дешевші на одиницю уловленого CO₂, в тому випадку, якщо газ, що обробляється, містить велику частку діоксиду вуглецю, це приводить до істотної економії витрат при використанні такої стадії уловлювання вуглецю для обробки димових газів повітрянагрівника.

На Фіг. 3 показаний переважний варіант втілення даного винаходу. Повітрянагрівник 300, який подібний до традиційного повітрянагрівника 200, показаного на Фіг. 2, включає камеру 301 згоряння, вогнетривкий матеріал 302, купол 303, впускний отвір 304, що використовується для

горіння повітря при традиційній роботі повітрянагрівника, що включає горіння повітря, інший впускний отвір 305, що використовується для низькосортного палива, такого як колошниковий газ, і отвори 306, 307, подібні до отворів 206, 207. Замість згоряння низькосортного палива з повітрям в камері згоряння встановлюють одну або декілька фурм 310, 311, 312, що використовуються для подачі описаного вище окисника з високим вмістом кисню в зону горіння. Окисник може бути отриманий у вигляді кисню на місці або поданий ззовні.

У всіх описаних тут варіантах втілення загальну кількість окисника на одиницю часу врівноважують відносно кількості низькосортного палива, що подається таким чином, щоб створити бажані умови для згоряння з точки зору стехіометрії.

Переважно, щоб кожна фурма 310, 311, 312 подавала окисник в зону горіння з високою швидкістю, переважно - щонайменше 200 м/сек, більш переважно - щонайменше зі швидкістю звуку. Таке високошвидкісне продування приводить до сильної турбулентності в камері для згоряння, в свою чергу, переносючи димові гази в зону горіння і тим самим розбавляючи полум'я таким чином, щоб воно розсіювалося з високою температурою, що не пошкоджує вогнетривкий матеріал повітрянагрівника.

Згідно з одним переважним варіантом втілення отвір фурми 310 розташований поблизу від впускного отвору 305 для палива. Згідно з одним переважним варіантом втілення отвір фурми 311 розташований на відстані від впускного отвору 305 для палива. Залежно від геометрії камери 301 для згоряння, одне з такого розташування або їх комбінація може забезпечити найкращу рециркуляцію димових газів в зону горіння. Додаткова фурма 312, встановлена далі відносно іншої фурми або фурми 310, 311, може бути використана для забезпечення ступінчастого процесу згоряння, в результаті чого загальний об'єм полум'я може бути збільшений ще більше. Природно, може бути встановлено більше однієї фурми кожного з описаних видів 310, 311, 312, доповнюючи одна іншу. При вдуванні окисника поблизу від впускного отвору 305 для палива переважним є додаткове вдування окисника далі по ходу процесу таким чином, щоб забезпечити ступінчастий процес згоряння.

Фіг. 4 являє собою загальну ілюстрацію іншого переважного варіанту втілення, в якому доменний повітрянагрівник 400 включає камеру 401 згоряння, вогнетривкий матеріал 402 і отвір 406.

Низькосортне паливо подають по трубопроводу 411, через пристрій для подачі 412 і впускний отвір 413. Окисник подають по трубопроводу 414, через пристрій для подачі 415 і фурму, що включає отвір 416. Фурму встановлюють таким чином, щоб її отвір 416 знаходився поблизу від отвору 413 для палива. Фурма переважно розташована коаксіально з отвором 413 для палива, як зображено на Фіг. 6. В результаті такого суміжного розташування, особливо коаксіального, і при вдуванні окисника при описаних вище високих швидкостях паливо ефективно переноситься в зону згоряння під дією ежектора з боку високошвидкісного окисника. У результаті досягається сильна рециркуляція продуктів згоряння в зоні згоряння, розширюючи фронт полум'я. При використанні такої високошвидкісної фурми поблизу від впускного отвору 413 для палива переважно одночасно використовувати вторинну фурму 312 для палива, що забезпечує надходження частини усього кисню, що подається, в інше місце в камері 401 згоряння, нижче по потоку від отвору 413 для палива, забезпечуючи ступінчасте згоряння низькосортного палива і тим самим полегшуючи отримання полум'я, яке розсіяне і не має пікової температури, достатньо високої для того, щоб пошкодити вогнетривкий матеріал повітрянагрівника.

Повітрянагрівник 400 може бути частиною стаціонарного заводу по виробництву чавуну і адаптований для роботи відповідно до даного винаходу з використанням традиційного способу, згідно з яким для підтримання згоряння доменного газу використовують повітря, доменний газ доповнюють коксовим газом або природним газом і згідно з яким відсутня рециркуляція продуктів згоряння у повітрянагрівнику 400.

Згідно з переважним варіантом втілення наявний традиційний повітряний пальник, який використовувався раніше для нагрівання наявного повітрянагрівника 400, на початковій стадії замінюють киснепаливним пальником 410, що включає описаний вище отвір 413 для палива і фурму для окисника. Термін "киснепаливний" пальник в даному описі стосується пальника, який працює на паливі і окиснику, при цьому окисник має високий вміст кисню, переважно - щонайменше 85 % кисню, більш переважно - щонайменше 95 % кисню.

Згідно з альтернативним, переважним варіантом втілення наявний повітряний пальник, описаний вище, на первинній стадії доповнюють однією або декількома високошвидкісними фурмами для окисника, як описано вище, і подачу повітря припиняють.

Як описано вище, таке високошвидкісне продування створює сильну турбулентність всередині камери 301, 401 згоряння, що забезпечує досить низькі пікові температури полум'я, що не пошкоджують вогнетривкі матеріали у повітрянагрівнику.

Однак, масова витрата димових газів буде нижчою при використанні окисника з високим вмістом кисню в порівнянні з використанням повітря як окисника. Це приводить до нижчого рівня конвективного теплообміну з вогнетривким матеріалом і, отже, більшої тривалості циклів нагрівання. Тому при перетворенні існуючого повітрянагрівника для роботи з окисником з високим вмістом кисню відхідні гази рециркулюють з повітрянагрівника назад в зону згоряння, як описано нижче в зв'язку з Фіг. 5 і 6.

Фіг. 5 являє собою загальну ілюстрацію повітрянагрівника 500 згідно з іншим переважним варіантом втілення, що включає камеру 501 згоряння, вогнетривкий матеріал 502 (що іноді називається "насадкою") і купол 503.

Під час роботи газу димові гази виходять з повітрянагрівника 500 через отвір 506. Однак частина димових газів рециркулюють назад в зону горіння в камері 501 згоряння через рециркулюючий пристрій 511. Пристрій 511 може включати транспортуючий пристрій, такий як вентилятор, для подачі рециркульованого димового газу в камеру 501 згоряння.

Рециркулюючий пристрій 511 також призначений для змішування рециркульованого димового газу з окисником з високим вмістом кисню, що має описаний вище склад і подається по трубопроводу 512. Змішування може бути здійснено за допомогою традиційних дифузorzів. Суміш рециркульованого димового газу і окисника потім подають в камеру 501 згоряння через отвір 513. Низькосортне паливо, таке як колошниковий газ з доменної печі, подають по трубопроводу 514, через пристрій для подачі 515 і впускний отвір 516. У результаті в зоні горіння паливо згоряє з окисником в присутності димових газів, які були рециркульовані в зону згоряння після того, як вони вже пройшли через повітрянагрівник 500. Таким чином розбавляють полум'я в камері 501 згоряння.

Використання такого рециркулювання відхідного газу дозволяє досягти досить високого рівня конвективного теплообміну, здатного забезпечити потрібну тривалість циклу нагрівання наявного повітрянагрівника, відносно якого застосовують спосіб згідно з даним винаходом. Це досягається за допомогою рециркуляції достатньої кількості димових газів для збереження потоку маси газу або термічної енергії за одиницю часу через повітрянагрівник 500 на рівні, щонайменше такому ж, як і потік маси газу або термічної енергії за одиницю часу, який був використаний при роботі наявного повітрянагрівника до переходу на операцію згідно з даним винаходом, з використанням окисника з низьким вмістом кисню без рециркуляції.

Як було згадано раніше, спосіб згідно з даним винаходом замінює горіння з використанням повітря калорійно збагаченого паливного газу з низькою теплотворною здатністю на киснепаливне горіння, при якому полум'я розбавляють рециркулюванням відхідного газу, наприклад, високоімпульсним перемішуванням простору горіння за допомогою фурм для інжектування окисника. Відпадає необхідність в додатковому паливному газі, що дорого коштує, з високою теплотворною здатністю, і повітрянагрівник забезпечується паливом з використанням одного лише доменного газу. Повітрянагрівники звичайно відповідають приблизно за 10 % загальної потреби в енергії для інтегрованого сталеливарного виробництва, при цьому приблизно 18 % енергії, що подається у повітрянагрівники, втрачається у відхідному газі. Рециркулювання відхідного газу зменшує такі втрати енергії і знижує кількість енергії, яка повинна надходити у повітрянагрівник від горіння відхідного газу. Тому спосіб згідно з даним винаходом поєднує деякі вигоди по використанню відхідного тепла з вигодами киснепаливного горіння.

Розглянемо гіпотетичний приклад використання доменної печі з робочим об'ємом 1500 м^3 , що працює з продуктивністю приблизно $2,2 \text{ т/м}^3/\text{день}$. Така піч випускає приблизно 138 тонн чавуну на годину, і, виходячи із звичайних об'ємів дуття, можна чекати, що вона витрачає $138000 \text{ Нм}^3/\text{год}$ гарячого дуття. Досягнення температури гарячого дуття, що складає 1200°C , потребує температури пальника для повітрянагрівника приблизно на 150°C вище, при цьому для нагрівання повітря до такої температури буде приблизно потрібно 230 ГДж/год . При ефективності повітрянагрівника, що складає близько 80 %, це означає, що споживана повітрянагрівниками енергія складе близько 290 ГДж/год або 145 ГДж/год для кожного повітрянагрівника при допусканні, що два повітрянагрівники отримують газ одночасно. Прийнято, що для нормальних робочих умов повітрянагрівника приблизно 18 % споживаної повітрянагрівниками енергії відходить у відхідному газі. Було встановлено, що для умов, які розглядаються, буде потрібна температура відхідного газу, що складає близько 250°C .

Ці умови використовували для встановлення гіпотетичних балансів по теплу і масі для трьох режимів роботи: "повітря-паливо" (тобто традиційний режим без рециркуляції відхідного газу);

"збагачене киснем" (тобто як "повітря-паливо", але з повітрям, збагаченим киснем) і "рециркуляція відхідного газу" (тобто відповідно до способу згідно з даним винаходом). Розрахунки були зроблені для встановлення постійної температури полум'я і постійного потоку маси продуктів згоряння таким чином, щоб зберегти умови конвективної передачі тепла.

5 Стехіометрію полум'я регулювали в кожному випадку так, щоб вміст надлишкового кисню у відхідному газі становив 1 %. Результати порівняння приведені в таблиці 3.

Таблиця 3

	BFG Нм ³ /год.	COG Нм ³ /год.	Повітря Нм ³ /год.	Кисень Нм ³ /год.	Рециркуляція відхідного газу, Нм ³ /год.	Теплота згоряння ГДж/год.	Темп. полум'я, °C	Маса відхідного потоку, кг/хв	Відхідний газ, %O ₂	Відхідний газ, %CO ₂
Повітря-паливо	34000	2400	34200	0	0	145	1347	1539	1	23
Збагачене киснем	40200	1200	26800	1300	0	145	1347	1545	1	27
Рециркуляція відхідного газу	44700	0	0	6220	14490	139	1347	1541	1	41

Видно, що в умовах, які розглядаються, збагачення киснем повітря, що подається у повітрянагрівники, зменшує, але не виключає кількість використовуваного коксового газу. Потік доменного газу збільшується, щоб зберегти кількість тепла, що підводиться, що дорівнює 145 ГДж/год. Вміст CO₂ у відхідному газі збільшується стрімко завдяки видаленню деякої кількості азоту з системи.

Здійснення рециркуляції відхідного газу усуває необхідність калорійного збагачення відхідного газу. Це пояснюється тим, що подальше невелике збільшення потоку доменного газу в поєднанні з поверненням фізичного тепла, що міститься у відхідному газі, є достатнім для досягнення бажаної температури полум'я. Потрібно зазначити, що при використанні рециркуляції відхідного газу окисником є не повітря, а газова суміш, що містить щонайменше 85 об. % кисню або по суті чистий кисень. (На цьому положенні основані отримані результати, показані в таблиці 3). Споживана енергія від згоряння знижується приблизно на 4 % завдяки поверненню енергії від рециркульованого відхідного газу.

Повітря видаляють, а горіння підтримують за допомогою промислового кисню. Важливо зазначити, що вміст CO₂ у відхідному газі збільшується з початкових 23 % до 41 %. Це дорівнює 50 тоннам CO₂ на годину для одного повітрянагрівника або 100 тоннам для двох повітрянагрівників, працюючих з використанням газу. 75 тонн з цієї кількості можуть бути піддані уловлюванню вуглецю і секвестуванню, а залишок - рециркуляції.

Для гіпотетичного випадку, що розглядається, розумно передбачити, що 138 тонн чавуну, що отримується кожен годину, перетворюються в 150 тонн сляба або іншого металевих продукту, який відповідає за правильність додавання скрапу під час виробництва сталі.

На основі промислових порівняльних даних можна стверджувати, що весь інтегрований сталеливарний завод буде виробляти приблизно 280 тонн CO₂ на годину. Отже, в прикладі рециркулювання відхідного газу, що розглядається, у повітрянагрівники (які ймовірно представляють собою каупери), становить приблизно 27 % від загальнозаводських викидів CO₂, доступних для уловлювання вуглецю.

Незважаючи на те, що прості баланси тепла і маси, подібні до балансів, деталізованих в таблиці 1, служать для ілюстрації основних переваг, що забезпечуються способом згідно з даним винаходом, вони не повністю відображають переваги. Зокрема, вони не враховують поліпшені умови теплопередачі, що забезпечуються перемиканням з режиму горіння "повітря-паливо" на режим "кисень-паливо". Для цієї мети може бути використана динамічна модель, яка відповідає за зміни загального коефіцієнта теплопередачі залежно від складу, температури і потоку маси у вогнетривкій насадці. Ряд моделюючих досліджень підігрівачів дуття показали, що виникаюча теплопередача може бути точно представлена загальним або "складовим" коефіцієнтом теплопередачі, який об'єднує дію конвекції і радіації. Так, в циклі роботи з газом він складає

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_r,$$

де

α_c = коефіцієнт конвективної теплопередачі, а

α_r = коефіцієнт радіаційної теплопередачі.

Коефіцієнт конвективної теплопередачі стосується швидкості потоку маси і може бути розрахований по рівняннях Sieder-Tate або Hausen. Коефіцієнт радіаційної теплопередачі виводять із закону Больцмана, який може бути виражений у вигляді

$$h_r = 1,713 \times 10^{-8} \left[\frac{\varepsilon_g \cdot T_g^4 - \alpha_g \cdot T_B^4}{T_g - T_B} \right],$$

5 де

ε_g = коефіцієнт випромінювання газу, який залежить від складу і температури і який може бути виведений з моделей сірого газу або з діаграм згідно з Hottel;

α_g = абсорбційна здатність газу;

T_g = температура газу;

10 T_B = середня температура місцевої насадки.

Зональну модель, яка втілює такі принципи і відповідає за теплопередачу насадці (вогнетривкій) і всередині неї, використовують для більш докладної оцінки переваг. Основою для порівняння служать робочі дані, отримані від набору сучасних повітрянагрівників Каупера, що забезпечують промислову порівняльну температуру гарячого дуття, що дорівнює 1250 °C.

15 Результати показані в таблиці 4.

Таблиця 4

Цикл дуття	Традиційні операції	Кисень Варіант 1	Кисень Варіант 2	Кисень Варіант 3
	30	30	25	25
Газовий цикл (8-хвилинна зміна)	52	52	42	42
BFG (доменний газ) Нм ³ /год.	91,237	133,742	134,636	147,292
BFG HV (теплотворна здатність доменного газу) МДж/Нм ³	3,1	3,1	3,1	3,1
Природний газ Нм ³ /год.	4,893	1,224	1,262	1,296
NG HV (теплотворна здатність природного газу) МДж/Нм ³	33,9	33,9	33,9	33,9
Швидкість подачі кисню у повітрянагрівник Нм ³ /год.	0,00	23,665	21,854	23,665
Загальна споживана енергія повітрянагрівником МДж/год.	448,707	456,094	460,153	500,540
повітрянагрівником МДж/цикл	388,879	395,281	322,107	350,378
Всього - робота 3 повітрянагрівників МДж/час	777,759	790,563	773,058	840,907
Швидкість вітру Нм ³ /год.	427,210	427,210	427,210	427,210
Холодне дуття, °C	200	200	200	200
Гаряче дуття, °C	1248	1246	1248	1261
Температура куполу, °C	1385	1385	1383	1384
Кінцева температура димової труби, °C	399	399	375	399
Планована річна економія витрат €	Відсутня	1,554,375	2,660,237	4,611,263
Об'єм відхідного газу повітрянагрівника Нм ³ /год.	205,875	196,076	201,981	207,466
CO ₂	23,05 %	45,43 %	45,43 %	45,43 %
Нм ³ /год.-CO ₂	47,454	89,077	91,760	94,189

Цікаво порівняти описані варіанти більш детально:

20 Традиційні операції показують, що у повітрянагрівнику використовують істотний рівень збагачення природного газу для отримання високої температури дуття, що дорівнює 1248 °C.

Всі три приклади (варіанти 1, 2 і 3 з використанням кисню) відповідають даному винаходу. У варіанті 1 з використанням кисню модель працює при такій же температурі дуття, об'ємі дуття і температурі димаря, як і при здійсненні традиційного способу. У цьому випадку отримують порівнянні результати відносно стійкого стану теплового балансу, оскільки, незважаючи на поліпшення рівня радіаційної теплопередачі цеглинам (вогнетривкої) насадки, дана перевага нейтралізувалася необхідністю збереження постійної температури димаря моделі. Фактично, оскільки теплоємність CO₂, що міститься в рециркульованому відхідному газі, вища, ніж теплоємність азоту, що замінюється ним, загальний результат полягає в тому, що дещо більша кількість енергії потрібна для підтримання постійної температури куполу і дуття. Проте, заміна

природного газу, що дорого коштує, більш дешевим джерелом палива є достатньою для компенсування як більшої кількості споживаної енергії, так і вартості кисню, що витрачається. Варто зазначити, що загальні коефіцієнти теплопередачі, розраховані за допомогою моделі, вищі на 13,5 % відносно згоряння повітря-палива поблизу від верху насадки, і навіть при нижчих температурах у напрямку до основи насадки загальний коефіцієнт теплопередачі підвищується приблизно на 8,5 %.

У варіанті 2 з використанням кисню поліпшенню умов теплопередачі сприяє можливість температури газу димаря знову урівноважитися до нижчої температури. Видно, що оскільки в насадці затримується більша кількість тепла, температура димаря падає приблизно на 25 °C. Результуюча дія полягає в тому, що тривалість циклу роботи з газом може бути скорочена при збереженні такої ж температури дуття. Загальний рівень споживаної енергії при використанні 3 повітрянагрівників гранично знижується, однак температура і об'єм дуття зберігаються навіть при нижчому об'ємі газу в димарі. Це важлива відмітна ознака, яка може бути використана при закупорюванні повітрянагрівника.

У варіанті 3 з використанням кисню зниження температури газу в димарі за допомогою підвищення витрати тепла здійснюють доти, доки не буде досягнута початкова температура газу в димарі в результаті збільшення витрати тепла доти, доки не буде відновлена початкова температура газу в димарі. Очевидно, що витрата тепла може бути підвищена майже на 10 %. Цього достатньо для підвищення температури дуття приблизно на 13°C, достатньо для істотної економії коксу в доменній печі.

Для того, щоб забезпечити доскональне розуміння часових і просторових коливань температури, швидкості і концентрації, що спостерігаються під час повного циклу повітрянагрівника, нарівні з динамічним тепловим балансом було використане обчислювальне гідродинамічне (CFD) моделювання. Деякі релевантні результати CFD моделювання подані на Фіг. 7-9, на яких введено такі позначення: T AF - температура повітря-паливо, T OF - температура кисень-паливо, U AF - швидкість повітря-паливо, U OF - швидкість кисень-паливо, AF - молярна частка повітря-паливо, OF - молярна частка кисень-паливо. Вони показують, що спосіб згідно з даним винаходом може бути застосований до подібних профілів полум'я, що отримуються під час традиційної роботи повітрянагрівника доменної печі з киснем як окисником і без рециркуляції відхідного газу. Тому може бути зроблений висновок про те, що спосіб згідно з даним винаходом може бути здійснений зі стабільним, видимим полум'ям і без досягнення пікових температур полум'я, здатних пошкодити вогнетривке покриття або насадку повітрянагрівника.

Звертаючись тепер до Фіг. 5, згідно з переважним варіантом втілення рециркулюють достатню кількість димових газів для того, щоб істотно зберігати або збільшувати проходження потоку маси газу через вогнетривкий матеріал за одиницю часу.

Згідно з альтернативним переважним варіантом втілення рециркулюють достатню кількість димових газів для того, щоб істотно зберігати або збільшувати передачу теплової енергії через вогнетривкий матеріал за одиницю часу. При цьому беруться до уваги різні теплоємності для різних інертних компонентів в димових газах. У цьому випадку також переважно рециркулювати достатню кількість димових газів з тим, щоб температура полум'я по суті підтримувалася або знижувалася.

Як також показано в таблиці 3, вміст CO₂ у відхідних газах, що виводяться з повітрянагрівника 500, набагато вищий - 41 мас. % в порівнянні з 23 мас. % при традиційному режимі роботи. Вартість одиниці маси уловленого CO₂ при використанні традиційних способів уловлювання вуглецю істотно знижується по мірі підвищення концентрації CO₂ з низьких рівнів до рівня, що становить приблизно 50-60 %. Підвищення концентрації за межі даного рівня принесе невелику вигоду. У результаті вартість стадії уловлювання вуглецю при обробці відхідних газів повітрянагрівника може бути істотно знижена на одиницю маси уловленого CO₂ при використанні окисника з високим вмістом кисню відповідно до даного винаходу.

Згідно з переважним варіантом втілення наявний традиційний повітряний пальник, який використовувався раніше для нагрівання існуючого повітрянагрівника 500, на початковій стадії замінюють впускним отвором 516 для палива і впускним отвором 513 для рециркульованих димових газів, після чого паливо спалюють за допомогою вищеописаного окисника з високим вмістом кисню. Для цього переважно, щоб окисник був підданий попередньому змішуванню з рециркульованими димовими газами. Як альтернатива переважно об'єднувати таке попереднє змішування з однією або декількома фурмами, як описано вище.

Фіг. 6 являє собою загальну ілюстрацію іншого переважного варіанту втілення даного винаходу, що показує повітрянагрівник 600 доменної печі з камерою 601 згоряння, вогнетривким матеріалом 602, отвором 606, трубопроводом 610 для рециркульованих димових газів,

пристроєм 611 для рециркулювання, трубопроводом 616 для подачі палива, пристроєм 617 для подачі палива і впускним отвором 618 для палива.

Окисник подають по трубопроводу 613 для подачі окисника і через пристрій 614 для подачі окисника в фурму для окисника, встановлену таким чином, щоб отвір 615 фурми знаходився поруч з отвором 612 для подачі рециркульованих димових газів, що надходять з пристрою 611 для рециркулювання. Фурма для окисника переважно розташована коаксіально з отвором 612 для рециркульованих димових газів. Так само як у випадку отвору 416 коаксіальної фурми, описаної в зв'язку з Фіг. 4, таке суміжне розташування, особливо коаксіальне, забезпечує ефективне перенесення рециркульованих димових газів в зону горіння під дією ежектора з боку високошвидкісного окисника, посилюючи рециркуляцію димових газів в камері 601 згоряння. До того ж, відпадає необхідність установа окремого проштовхувального механізму в пристрої 611 для рециркулювання, оскільки рециркульовані димові гази прискорюються під дією ефекту ежекції отвору 615.

Варіант втілення, показаний на Фіг. 6, доцільно поєднувати з використанням додаткової фурми для окисника, що забезпечує надходження додаткової кількості окисника на ділянку в зоні згоряння, розташовану на деякій відстані від отвору 615, тим самим забезпечуючи ступінчасте горіння в зоні згоряння.

Як згадано вище, також переважно, щоб повітрянагрівник 300, 400, 500, 600 був з'єднаний з відповідною стадією 350, 450, 550, 650 по уловлюванню вуглецю, яка може бути традиційною *reg se*, відділяючи діоксид вуглецю в димових газах, що відводяться з повітрянагрівника, до потрапляння димових газів в навколишнє середовище.

Коли вік повітрянагрівника доменної печі наближається до його очікуваного терміну корисного використання, переважно застосовувати до повітрянагрівника один з описаних тут варіантів втілення або комбінацію декількох з них.

У результаті термін корисного використання повітрянагрівника може бути продовжений, завдяки роботі з нижчими температурами полум'я при збереженні норм вироблення відносно повітря, що вдувається, кращій економії палива і нижчим рівням викидів.

Таким чином, спосіб згідно з даним винаходом дозволить повітрянагрівнику доменної печі працювати тільки на низькосортному паливі, такому як доменний колошниковий газ, без необхідності надання паливу вищої теплотворної здатності і без ризику, викликаного температурою пошкодження повітрянагрівника, з отриманням відхідних газів, які краще підходять для уловлювання вуглецю. Крім того, він дозволяє продовжити термін корисного використання повітрянагрівника.

При достатньому рівні рециркулювання димових газів також може бути отримана така ж кількість і якість повітря, що вдувається, у наявному повітрянагрівнику, яке перетворюють для роботи з окисником з високим вмістом кисню, при цьому повітрянагрівник забезпечують пристроєм для рециркуляції димових газів, описаним в зв'язку з Фіг. 5 або 6. Вище були описані переважні варіанти втілення. Однак для фахівця очевидно, що описані варіанти втілення можуть бути піддані багатьом модифікаціям без порушення даного винаходу.

Наприклад, будь-який зі способів забезпечення рециркуляції димових газів, описаний в зв'язку з Фіг. 4-6, може бути доцільно доповнений однією або декількома різними фурмами для окисника, як описано в зв'язку з Фіг. 3.

Більше того, рециркульовані димові гази, що прискорюються ефектом ежекції, як описано в зв'язку з Фіг. 6, можуть бути доцільно попередньо змішані з деякою кількістю окисника з високим вмістом кисню способом, подібним до способу, описаного в зв'язку з Фіг. 5.

Прискорення під дією ефекту ежекції попередньо змішаних або незмішаних рециркульованих димових газів, як описано в зв'язку з Фіг. 6, також може бути доцільно скомбіновано з прискоренням під дією ефекту ежекції низькосортного палива, як описано в зв'язку з Фіг. 4.

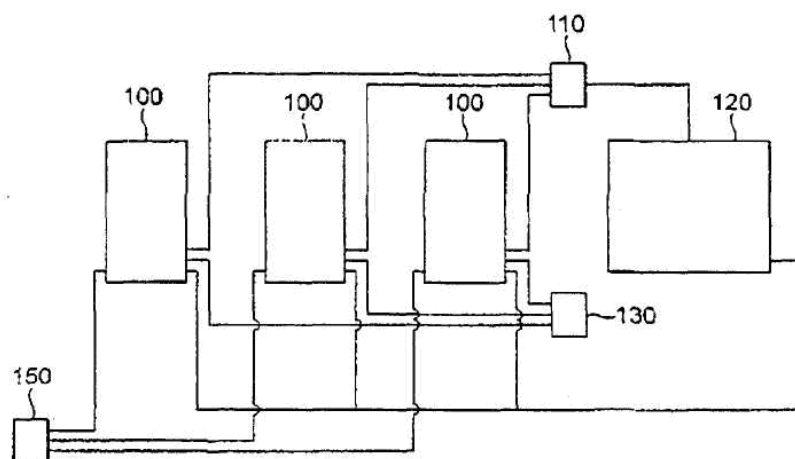
Тепло може бути повернене з неретикульованих димових газів. Додатково або як альтернатива димовий газ може бути підданий уловлюванню вуглецю.

Спосіб згідно з даним винаходом може бути застосований до доменних повітрянагрівників Калугіна як альтернатива повітрянагрівникам, проілюстрованих на кресленнях.

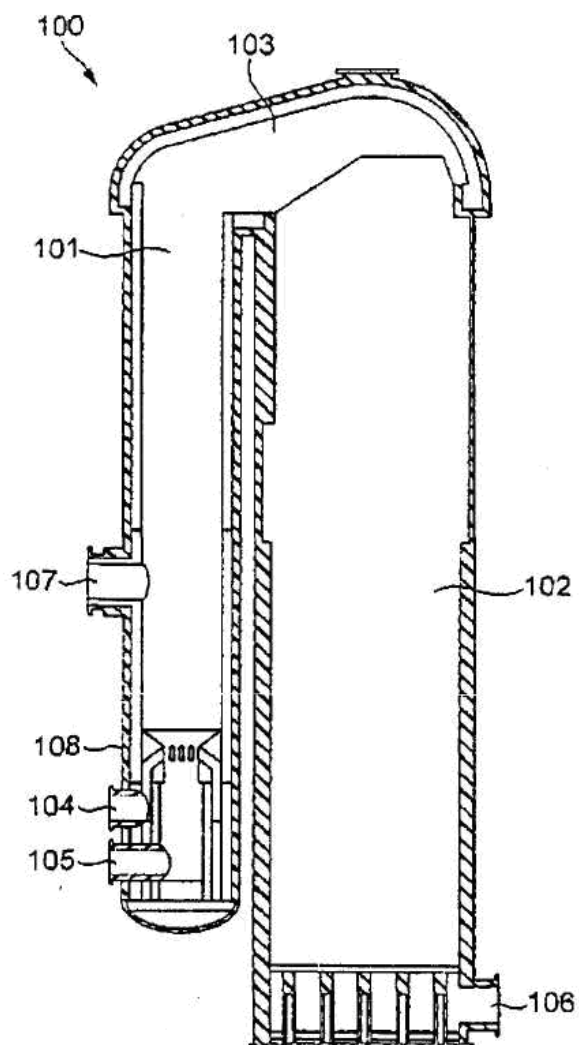
Мається на увазі, що описані тут варіанти втілення є усього лише ілюстративними і можуть бути піддані змінам і модифікаціям фахівцем в даній галузі техніки без порушення суті і об'єму даного винаходу. Передбачається, що всі такі зміни і модифікації входять в об'єм даного винаходу, як розкрито і заявлено в даному описі. Крім того, всі розкриті варіанти втілення не обов'язково є альтернативними, оскільки різні варіанти втілення даного винаходу можуть бути об'єднані для отримання бажаного результату.

ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

1. Спосіб нагрівання повітрянагрівника доменної печі, що включає горіння палива з низькою теплотворною здатністю (LHV), що становить 9 МДж/Нм³ або менше, в зоні горіння, в якій
- 5 підтримують стійке, видиме полум'я, що забезпечується в камері згоряння у повітрянагрівнику, і пропускають димові гази через вогнетривкий матеріал у повітрянагрівнику для його нагрівання, при цьому паливо спалюють з окисником, що містить щонайменше 85 мас. % кисню, причому забезпечують рециркуляцію димових газів в зону горіння, тим самим розбавляють в ній суміш палива і окисника достатньою мірою, щоб полум'я не пошкодило вогнетривкий матеріал.
- 10 2. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що забезпечують рециркуляцію димових газів з зони всередині камери згоряння, але за межами частини камери згоряння, зайнятої зоною горіння, при цьому окисник подають в зону горіння з високою швидкістю через фурму, забезпечують тим самим перенесення димових газів в зону горіння з послабленням полум'я.
3. Спосіб за п. 2, який **відрізняється** тим, що окисник вдують зі швидкістю, що складає
- 15 щонайменше 200 м/сек.
4. Спосіб за п. 2, який **відрізняється** тим, що окисник вдувають щонайменше зі швидкістю звуку.
5. Спосіб за п. 2, який **відрізняється** тим, що фурма має отвір поруч з отвором для подачі палива для перенесення палива в зону горіння під дією ежекції.
- 20 6. Спосіб за п. 5, який **відрізняється** тим, що поруч з отвором для подачі палива використовують вторинну фурму, яка забезпечує надходження частини кисню, що подається, в інше місце в камері згоряння нижче за потоком від отвору для подачі палива, для забезпечення ступінчастого горіння палива.
7. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що попередньо переобладнують пальник
- 25 повітрянагрівника додаванням до нього однієї або декількох високошвидкісних фурм для додаткового введення окисника в зону горіння, причому пальник забезпечують сполученням з рециркулюючими димовими газами.
8. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що димові гази, що пройшли через вогнетривкий матеріал, рециркулюють назад в зону горіння.
- 30 9. Спосіб за п. 8, в який **відрізняється** тим, що рециркульовані димові гази попередньо змішують зі згаданим окисником до надходження в зону горіння.
10. Спосіб за п. 8, який **відрізняється** тим, що достатню кількість димових газів рециркулюють таким чином, що загальний процентний вміст за об'ємом кисню інертної частини атмосфери в камері згоряння, за винятком враховуваних неінертних компонентів палива, не перевищує 12 %.
- 35 11. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що попередньо нагрівають повітря наявним повітрянагрівником, пристосовуючи його для здійснення згаданого способу, використовуючи отвір для палива і отвір для рециркульованих димових газів як повітряний пальник, після чого паливо спалюють зі згаданим окисником.
12. Спосіб за п. 11, який **відрізняється** тим, що достатню кількість димових газів рециркулюють
- 40 для підтримання проходження потоку маси газу в одиницю часу через вогнетривкий матеріал на рівні, який щонайменше такий самий, як і потік маси газу за одиницю часу, який використовувався при роботі наявного повітряного пальника без рециркулювання.
13. Спосіб за п. 11, який **відрізняється** тим, що достатню кількість димових газів рециркулюють для підтримання температури полум'я на рівні, такому ж або нижчому, а перенесення теплової енергії у вогнетривкий матеріал на рівні, такому ж або вищому, як і температура полум'я і перенесення теплової енергії за одиницю часу, відповідно, яких досягають при роботі наявного повітряного пальника без рециркулювання.
- 45 14. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що паливо включає доменний колошниковий газ.
15. Спосіб за п. 14, який **відрізняється** тим, що доменний колошниковий газ надходить з
- 50 доменної печі, яку забезпечують гарячим повітрям повітрянагрівником.
16. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що паливо включає калорійно збагачений доменний колошниковий газ.
17. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що температуру полум'я підтримують на рівні, нижчому ніж 1400 °С.
- 55 18. Спосіб за п. 17, який **відрізняється** тим, що температуру полум'я підтримують на рівні, нижчому ніж 1350 °С.



Фіг. 1
(Відомий спосіб)



Фіг. 2
(Відомий спосіб)

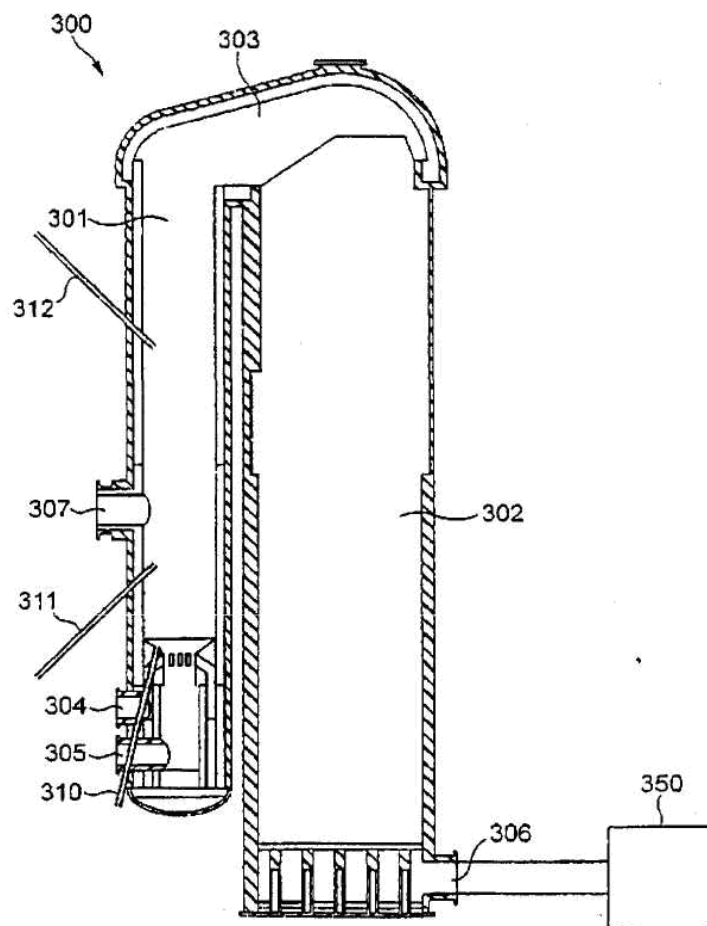


Fig. 3

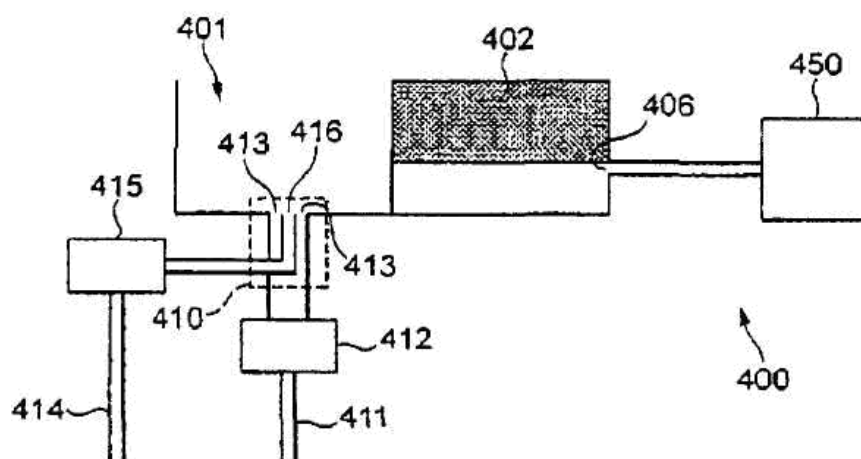
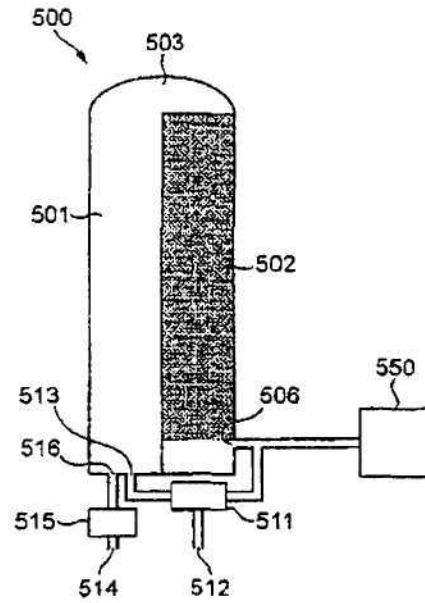
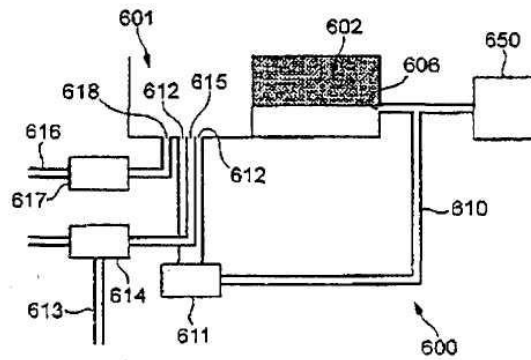


Fig. 4

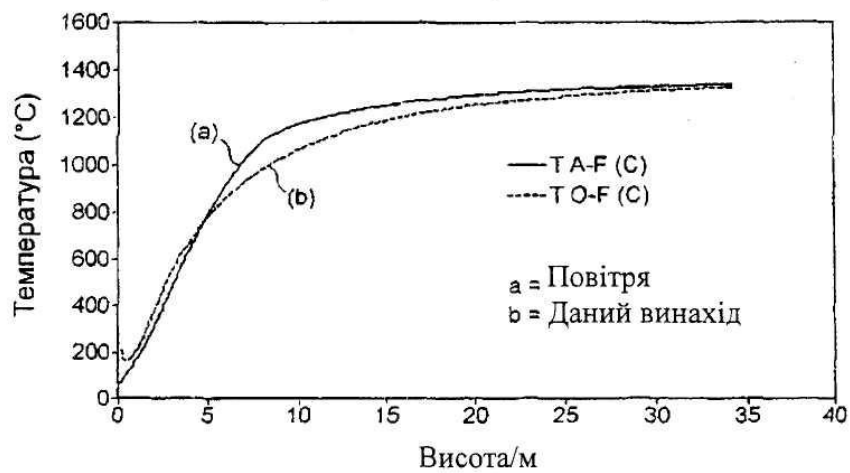


Фиг. 5



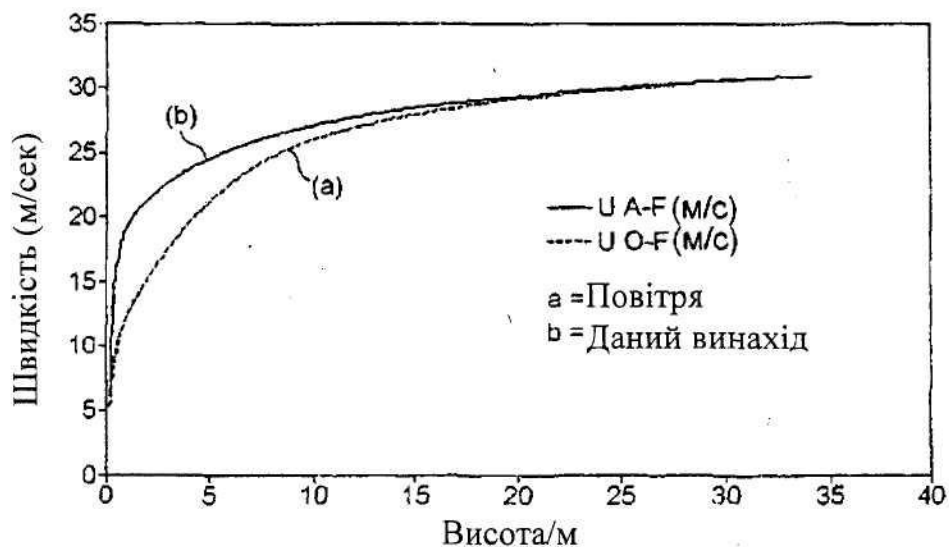
Фиг. 6

Аксіальні температурні профілі повітря-палива для варіантів з використанням горіння кисню-палива



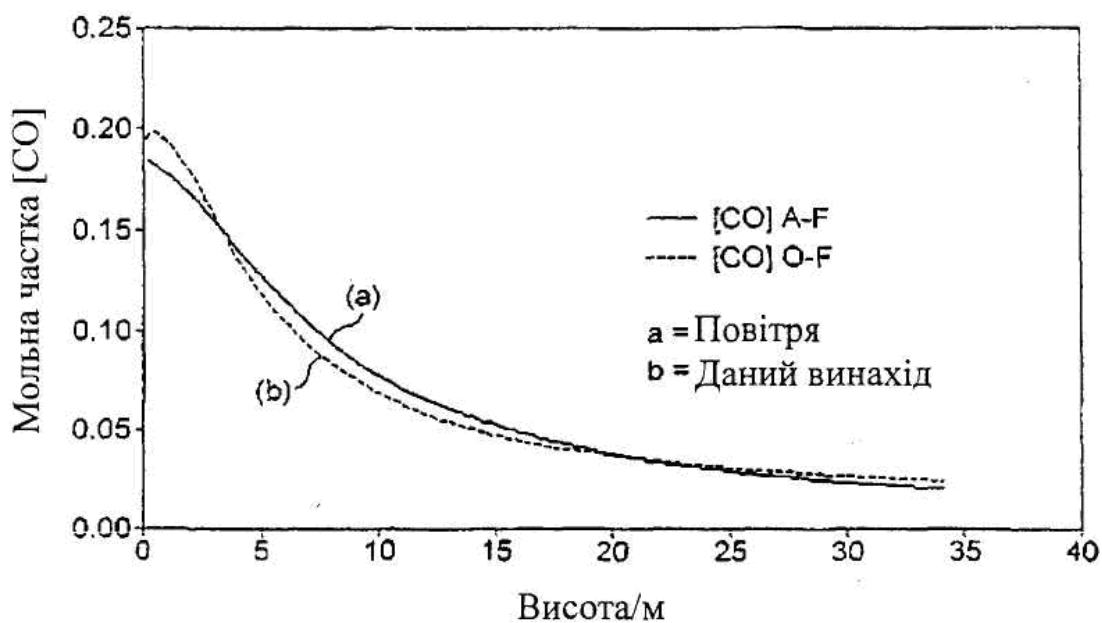
Фиг. 7

Аксiальнi профiлi швидкостi повітря-палива для
варіантiв з використанням горіння кисню-палива



Фіг. 8

Аксiальнi профiлi концентрації CO повітря-палива для
варіантiв з використанням горіння кисню-палива



Фіг. 9

Комп'ютерна верстка Г. Паяльніков

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Урицького, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601