

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **044009**

(13) **B1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента
2023.07.18

(21) Номер заявки
202290712

(22) Дата подачи заявки
2020.09.24

(51) Int. Cl. **C21B 11/02** (2006.01)
C21B 13/00 (2006.01)
C21B 13/02 (2006.01)

(54) **СПОСОБ ПРЯМОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОДОРОДА**

(31) **62/906,954; 17/029,778**

(32) **2019.09.27; 2020.09.23**

(33) **US**

(43) **2022.06.16**

(86) **PCT/US2020/052373**

(87) **WO 2021/061896 2021.04.01**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
МИДРЭКС ТЕКНОЛОДЖИЗ, ИНК.
(US)

(72) Изобретатель:
Бастоу-Кокс Кит Маршалл, Синтрон
Энрике Жозе, Хьюз Грегори Дарел
(US)

(74) Представитель:
Носырева Е.Л. (RU)

(56) **WO-A2-2013093640**
US-A1-2013205951
WO-A2-2014040990

(57) Способ/система прямого восстановления, включающие: добавление переменных количеств природного газа, водорода и окисляющего газа, не содержащего углерода, к потоку сырьевого газа выше по потоку относительно установки риформинга; осуществление риформинга потока сырьевого газа в установке риформинга с образованием потока риформинг-газа и осуществление доставки потока риформинг-газа в шахтную печь, где поток риформинг-газа применяют для восстановления материала на основе металлической руды с получением металлического материала прямого восстановления. Поток сырьевого газа включает поток колошникового газа, рециркулированного из шахтной печи. Необязательно окисляющий газ, не содержащий углерода, включает пар, и способ дополнительно включает регулирование расхода пара для поддержания максимального значения k-фактора потока сырьевого газа на уровне 0,74 или ниже. Необязательно переменное количество водорода выбрано для замены 20-90% природного газа на основании топливного числа. Переменное количество водорода выбрано на основании доступного поступления водорода.

044009
B1

044009
B1

Область техники

Настоящее изобретение в целом относится к областям прямого восстановления (DR) и производства стали. Более конкретно, настоящее изобретение относится к способу и системе преобразования способа DR, такого как способ MIDREX или подобный, с использованием природного газа в способ DR с использованием смеси переменного состава из природного газа (NG) и водорода (H₂), что обеспечивает возможность получения железа прямого восстановления (DRI), характеризующегося сниженным содержанием углерода и более низкими общими выбросами диоксида углерода (CO₂).

Уровень техники

В современном MIDREX NG и аналогичных способах используется высокооптимизированная установка риформинга для получения синтез-газа из NG для восстановления железной руды. Такие способы характеризуются выбросами большого количества CO₂ вследствие наличия углерода в NG. Предпринимаются конкретные попытки по декарбонизации частей сталелитейной промышленности, поскольку различные регионы стремятся снизить выбросы CO₂. Одна из таких попыток заключается в замене подаваемого NG на H₂. Несмотря на то, что для осуществления этого существуют другие способы и системы, для большинства из них требуется полная предварительная замена как источника восстановительного газа, так и оборудования. Это накладывает существенные ограничения на освоение H₂ в качестве источника восстановительного газа, поскольку H₂ пока не является экономически целесообразным, и существуют значительные неопределенности в отношении сроков и роста поступления H₂. Одна из ключевых проблем заключается в том, что поступление H₂ может зависеть от колебаний возобновляемых источников энергии, таких как солнечная энергия и ветер. В таких условиях стандартные технологические схемы MIDREX и аналогичные им не могут эксплуатироваться с H₂ без существенного влияния на качество DRI, ограничения срока службы установки риформинга и ухудшения стабильности катализатора. Таким образом, проблемы, которые следует решить, включают: эксплуатацию традиционной установки для DR на основе NG с периодическим поступлением H₂; эффективный переход с существующих установок для DR на основе NG к восстановлению на основе H₂ и защиту оборудования во время таких переходов.

Сущность изобретения

В одном иллюстративном варианте осуществления в настоящем изобретении предусматривается способ прямого восстановления, включающий: добавление переменных количеств природного газа, водорода и окисляющего газа, не содержащего углерода, к потоку сырьевого газа выше по потоку относительно установки риформинга; осуществление риформинга потока сырьевого газа в установке риформинга с образованием потока риформинг-газа и осуществление доставки потока риформинг-газа в шахтную печь, где поток риформинг-газа применяют для восстановления материала на основе металлической руды с получением металлического материала прямого восстановления. Поток сырьевого газа включает поток колошникового газа, рециркулированного из шахтной печи. Необязательно способ также включает одно или более из мокрой скрубберной очистки и сжатия потока колошникового газа. Необязательно способ включает добавление переменных количеств природного газа, водорода и окисляющего газа, не содержащего углерода, к потоку сырьевого газа выше по потоку относительно установки риформинга и предварительного подогревателя, расположенного выше по потоку относительно установки риформинга. Необязательно окисляющий газ, не содержащий углерода, включает пар. Необязательно способ дополнительно включает регулирование расхода пара для поддержания максимального значения k-фактора потока сырьевого газа на уровне 0,74 или ниже. Необязательно переменное количество водорода выбрано для замены 20-90% природного газа на основании топливного числа. В качестве альтернативы, переменное количество водорода выбрано для замены 30-70% природного газа на основании топливного числа. Переменное количество водорода выбрано на основании доступного поступления водорода. Необязательно переменное количество водорода выбрано на основании доступного поступления водорода из возобновляемого источника водорода.

В другом иллюстративном варианте осуществления в настоящем изобретении предусматривается система прямого восстановления, включающая: источники внешнего газа, выполненные с возможностью добавления переменных количеств природного газа, водорода и окисляющего газа, не содержащего углерода, к потоку сырьевого газа выше по потоку относительно установки риформинга, выполненной с возможностью осуществления риформинга потока сырьевого газа с образованием потока риформинг-газа, и шахтную печь, выполненную с возможностью приема потока риформинг-газа и применения потока риформинг-газа для восстановления материала на основе металлической руды с получением металлического материала прямого восстановления. Поток сырьевого газа включает поток колошникового газа, рециркулированного из шахтной печи. Необязательно система также включает одно или более из мокрого скруббера, выполненного с возможностью мокрой скрубберной очистки, и компрессора, выполненного с возможностью сжатия потока колошникового газа. Необязательно источники внешнего газа выполнены с возможностью добавления переменных количеств природного газа, водорода и окисляющего газа, не содержащего углерода, к потоку сырьевого газа выше по потоку относительно установки риформинга и предварительного подогревателя, расположенного выше по потоку относительно установки риформинга. Необязательно окисляющий газ, не содержащий углерода, включает пар. Необязательно система дополнительно включает регулятор расхода, выполненный с возможностью регулирования расхода пара

для поддержания максимального значения k-фактора потока сырьевого газа на уровне 0,74 или ниже. Необязательно переменное количество водорода выбрано для замены 20-90% природного газа на основании топливного числа. В качестве альтернативы, переменное количество водорода выбрано для замены 30-70% природного газа на основании топливного числа. Переменное количество водорода выбрано на основании доступного поступления водорода. Необязательно переменное количество водорода выбрано на основании доступного поступления водорода из возобновляемого источника водорода.

Соотношения водорода и природного газа определяются общей потребностью в энергии для получения DRI при заданном качестве продукта и доступности водорода. Типичными контролируемыми качествами продукта являются процентная доля металлизации, которая представляет собой количество металлического железа в процентах по весу от общего количества железа, и количество содержащегося в продукте углерода, которое представляет собой количество углерода в продукте в процентах по весу. Достаточный поток газа при подаче на входе является необходимым для обеспечения поддержания качества восстановительного газа и удовлетворения потребностей в энергии в печи для проведения восстановительных реакций для достижения металлизации. Процентная доля металлизации является основным фактором, поскольку она определяет количество восстановителя, необходимое для удаления кислорода из оксида железа. Общая потребность в энергии в способе, с учетом добавления углерода, составляет ~70% от требуемой энергии. Оставшиеся ~30% в основном представляют собой потери физического тепла на различных стадиях способа, например, в скруббере колошникового газа или в дымовой трубе. Комбинирование и выбор расхода природного газа и водорода будут зависеть от доступности водорода, затрат, связанных с выбросами CO₂, и необходимого содержания углерода в продукте.

Краткое описание графических материалов

Настоящее изобретение проиллюстрировано и описано со ссылкой на различные графические материалы, на которых подобные номера ссылок используют для обозначения подобных компонентов системы/стадий способа соответственно, и где:

на фиг. 1 представлено схематическое изображение, на котором показан один вариант осуществления способа прямого восстановления на основе H₂ по настоящему изобретению, и

на фиг. 2 представлена кривая значений k-фактора для реакции вода-углерод.

Подробное описание иллюстративных вариантов осуществления

Настоящее изобретение в целом относится к улучшению MIDREX NG и аналогичных способов восстановления железных руд. Общий способ, описанный в данном изобретении, предусматривает модификации в связанные установки, которые обеспечивают возможность изменять в потоке источник газообразного топлива для подачи восстановительного газа. В одном иллюстративном варианте осуществления газообразный H₂ в ходе способа подают взаимозаменяемо с NG, в зависимости от ежедневных изменений доступности H₂. Этот способ отличается от других способов, разработанных для конкретных составов топлива.

Конкретнее, ссылаясь на фиг. 1, в одном иллюстративном варианте осуществления представлена блок-схема способа 110 DR по настоящему изобретению. Оксид железа 11 входит через верхнюю часть шахтной печи 120, где он восстанавливается до DRI в результате реакций с H₂ и монооксидом углерода (CO). DRI выходит из шахтной печи под действием силы тяжести в виде холодного DRI (CDRI), горячего DRI (HDRI), горячебрикетированного железа (HBI) и т.д. 50. Такие способы являются общеизвестными специалистам в данной области техники и не описаны более подробно в данном изобретении. Отработанный восстановительный газ 12 низкого давления (также называемый колошниковым газом) при температуре, составляющей приблизительно 350°C, выходит из верхней части шахтной печи 120 и направляется в мокрый скруббер 130 для удаления пыли и выносимых мелких фракций. После обеспыливания колошниковый газ 12 разделяют на два потока: технологический газ 13 и топливный колошниковый газ 16. Технологический газ 13 рециркулируют и сжимают в компрессоре 140 до давления, составляющего приблизительно 2,0 бар изб., при температуре, составляющей приблизительно 150°C. Затем добавляют NG 14, H₂ 22 и пар 21 к технологическому газу 13. NG 14 характеризуется температурой, составляющей приблизительно 25°C, H₂ 22 характеризуется температурой, составляющей приблизительно 25°C, и пар 21 характеризуется температурой, составляющей приблизительно 300°C. Полученный сырьевой газ 15 предварительно подогревают до температуры, составляющей приблизительно 560°C, в блоке 150 рекуперации тепла и подогретый сырьевой газ 17 направляют в установку 160 риформинга. Риформинг-газ 19 при давлении, составляющем приблизительно 1,8 бар изб., и температуре, составляющей приблизительно 950°C, направляют в шахтную печь 120. Топливный колошниковый газ 16 применяют в качестве топлива 18 горелки для установки 160 риформинга или необязательно парового котла 170. В данном иллюстративном варианте осуществления внешние газы 14, 22 и 21 добавляют к сырьевому газу 15 и смешивают с сырьевым газом 15 выше по потоку относительно блока 150 рекуперации тепла, но их также можно вводить в поток 17 предварительно подогретого сырьевого газа ниже по потоку относительно блока 150 рекуперации тепла и выше по потоку относительно установки 160 риформинга. Расход пара 21 регулируют на основании входящего химического состава потока 17 предварительно подогретого сырьевого газа на входе в установку 160 риформинга и регулируют в зависимости от доступности H₂ 22.

В данном изобретении предпочтительный химический состав потока 17 предварительно подогретого сырьевого газа на входе в установку 160 риформинга представляет собой смесь водорода, монооксида углерода, диоксида углерода, воды и природного газа при температуре, составляющей приблизительно 450-600°C, и давлении, составляющем приблизительно 1,6-1,9 бар изб. Предпочтительный химический состав риформинг-газа 19 на выходе из установки 160 риформинга преимущественно представляет собой водород и монооксид углерода, при этом качество газа составляет >10, температура составляет приблизительно 850-1000°C, и давление составляет приблизительно 1,7-2,0 бар изб. Количество NG 14, добавляемого к сырьевому газу 15, основано на общей потребности в энергии для получения DRI при заданных производительности и качестве. Аналогично, количество H₂ 22, добавляемого к сырьевому газу 15, основано на доступности источника водорода и потребностях в энергии для получения DRI при заданных производительности и качестве. Аналогично, количество пара 21, добавляемого к сырьевому газу 15, основано на требованиях к химическому составу для предотвращения разложения углерода на входе в установку риформинга. Такие добавления внешних газов 14, 22 и 21 являются изменяемыми и могут колебаться в зависимости от предпочтений в отношении химического состава и доступности H₂ 22 в целом. Состав подаваемой смеси из природного газа 14 и водорода 22 определяется общей потребностью в энергии способа восстановления и, в меньшей степени, потоками, необходимыми для адаптации количества содержащегося в продукте углерода. В случае традиционного способа на основе природного газа необходимая энергия составляет около 2,5 Гкал нетто на тонну продукта. При небольших изменениях потребления водорода один моль водорода заменяет примерно 0,3 моля природного газа вследствие их различной низшей теплоты сгорания, составляющей 2500 ккал/Нм³ для водорода и 8500 ккал/Нм³ для природного газа. Однако по мере увеличения потребления водорода во всем диапазоне замещения энергия больше не требуется для риформинга природного газа, и общая потребность приближается к приблизительно 1,8 Гкал нетто на тонну продукта при полном замещении. Например, расход 440 Нм³ водорода на тонну продукта может обеспечить ~50% новой общей потребности в энергии для получения одной тонны DRI. Оставшиеся ~50% энергии обеспечиваются за счет природного газа при расходе ~140 Нм³ природного газа на тонну продукта. Другие соотношения могут быть выбраны аналогичным образом, в зависимости от ежечасной доступности водорода. В дополнение к снижению потребностей в энергии, существует несколько подсистем, в которых применяют природный газ. Наиболее важным является природный газ, добавляемый для получения необходимого количества содержащегося в продукте углерода. Примером подсистемы является добавление природного газа в переходную зону или природный газ, который добавляют непосредственно в шахтную печь в области под кольцевым воздухопроводом. Расход природного газа в переходной зоне может сильно варьироваться в диапазоне от 10 до 60 Нм³ природного газа на тонну продукта, в зависимости от необходимого количества содержащегося в продукте углерода, характеристик карбюрирования твердого сырьевого материала и эксплуатации печи. Для поддержания необходимого количества содержащегося в продукте углерода требуется аналогичный диапазон природного газа, даже если в ходе способа добавляют водород. Поскольку осаждение углерода зависит от значений концентрации метана и СО, в некоторых случаях подачу природного газа в эти системы можно увеличивать для поддержания того же количества содержащегося в продукте углерода. В целом, этот эффект, как правило, происходит при более высоких значениях коэффициента замещения природного газа. Эффективность рекуперации тепла также влияет на общую требуемую энергию и, таким образом, влияет на выбор смеси сырьевых газов. Как правило, из-за стационарного оборудования эффективность рекуперации тепла изменится, поскольку добавление большего количества водорода заменяет подачу природного газа. Влияние добавления водорода в ходе традиционного способа MIDREX NG подробно рассмотрено далее в раскрытии способа.

Способ по настоящему изобретению характеризуется ключевыми преимуществами по сравнению с традиционными способами восстановления. Для традиционного способа на основе NG требуется жесткое регулирование расхода сырьевого потока и состава. Резкие изменения могут иметь тяжелые последствия для установки: образование кластеров в шахтной печи, разрушение труб установки риформинга и т.д. Наиболее значительным из них является катастрофическая деактивация катализатора, которая происходит, когда углерод осаждается на катализаторе и физически разрушает его.

В настоящем изобретении контролируемое введение водяного пара в сырьевой газ частично устраняет вышеуказанные эффекты и при этом сводит к минимуму нарушение качества получаемого железа. Это, по сути, обеспечивает возможность одновременного применения несколько различных источников восстановительного сырьевого газа, например, NG и H₂, если доступность одного или обоих источников является непостоянной. Положительные эффекты этого включают способствование существующим технологиям восстановления на основе NG осуществлять применение H₂ из возобновляемых источников в качестве способа снижения выбросов СО₂.

Настоящее изобретение можно применять в различных ситуациях, таких как: источники H₂ с переменной производительностью, такие как получение H₂ на основе солнечной энергии или энергии ветра, или поэтапное осуществление постоянного получения H₂, например, электролиз. Это обеспечивает гибкость в отношении источника топлива, который можно применять на существующих установках на ос-

нове NG; в частности, H_2 из экологически чистых источников, где поступление будет варьироваться в зависимости от ежедневных изменений, таких как солнечная энергия или энергия ветра.

В случае способов восстановления железа на основе NG, NG обычно подвергают риформингу в синтез-газ, который, в свою очередь, вступает в реакцию с оксидом железа с образованием продукта DRI. Основные реакции риформинга метана являются следующими:



В принципе, это означает, что H_2 может непосредственно заменить NG в технологическом сырьевом газе. Однако необходимо учитывать сродство к осаждению углерода в установке риформинга. Газы с более высоким содержанием углерода могут увеличить вероятность осаждения, но одного этого недостаточно для определения образования углерода. Из различных реакций углерода наиболее важными для рассмотрения являются следующие:



Исходя из уравнения (4), присутствие H_2 или CO увеличивает предпочтение в отношении образования углерода. Вода, с другой стороны, предотвращает образование углерода. CO_2 обычно слабо влияет на изменение предпочтения в отношении образования углерода, поскольку он вступает в реакцию с метаном с образованием CO и, тем самым, отменяет его реакцию в качестве окислителя. Константа равновесия, определенная по активности, для уравнения (4) равняется:

$$K_{экр.} = \frac{\{H_2O\}}{\{CO\}\{H_2\}} \quad (5)$$

Исходя из коммерческого опыта, MIDREX разработала упрощенную версию константы равновесия, как определено в уравнении (6). Это уравнение, называемое k-фактором, определяется следующим образом, где X представляет собой соответствующий мол. % газа i в составе газа и не включает условия давления в системе:

$$k\text{-фактор} = \frac{x_{CO}x_{H_2}}{x_{H_2O}} \quad (6)$$

Это уравнение помогает определить вероятность осаждения углерода. В целом, как показали коммерческий опыт и исследования, установки могут работать при значениях k-фактора, составляющих около 0,5, при этом теоретический максимум составляет 0,74.

В случае традиционной технологии, вход в установку риформинга работает в пределах области, где осаждение углерода является термодинамически благоприятным. Для этого способа эксплуатации требуется точное регулирование температуры и состава входящего газа для предотвращения осаждения углерода. Катализатор подвергается способу пассивации серой, чтобы снизить его активность на входе в трубу, где реакции углерода являются крайне благоприятными вследствие более низкой температуры. Более низкая активность обеспечивает возможность сырьевому газу оставаться вне равновесия до тех пор, пока газ не нагреется достаточно, чтобы больше не способствовать осаждению углерода. Поскольку система находится вне равновесия, каждую реакцию углерода необходимо оценивать отдельно для безопасной эксплуатации установки риформинга. Как показал коммерческий опыт, уравнение (4) является наиболее ограничивающим. Как указано ранее и как представлено на фиг. 2, установка риформинга MIDREX работает при значении k-фактора, составляющем 0,5 (пунктирная линия), в случае технологической схемы на основе NG. Для области осаждения углерода является благоприятным равновесие в области $<650^\circ\text{C}$ на фиг. 2, которая является типичной температурной областью предварительного подогревания сырьевого газа.

Сочетание этих факторов означает, что необходимо уделять особое внимание при добавлении H_2 с частичной заменой NG. Добавление внешнего H_2 еще больше направляет реакцию в сторону осаждения углерода. Единственный способ противостоять этому заключается в увеличении содержания воды на входе в установку риформинга.

В традиционном способе содержание воды определяется условиями насыщения в скруббере технологического газа. Там техническую воду применяют для обеспыливания, охлаждения и конденсации избыточной воды из колошникового газа. Вследствие ограничений внутри системы рабочая температура, как правило, находится в диапазоне $55\text{--}65^\circ\text{C}$. Это ограничивает количество воды, присутствующей в технологическом газе, что, в свою очередь, ограничивает количество H_2 , который можно добавить, и обеспечивает достижение значений k-фактора ниже 0,7. Для безопасной эксплуатации во всех диапазонах добавления H_2 необходимо добавлять больше воды, чем можно получить при традиционных условиях эксплуатации скруббера. Таким образом, традиционная технологическая схема MIDREX NG может обрабатывать не более $200 \text{ Nm}^3 H_2$ на тонну DRI, полученного в технологическом контуре, без неблагопри-

ятных последствий для установки риформинга. Это представляет собой замену только примерно 20% NG на основании топливного числа в традиционном способе. Традиционная технология также может работать на стороне с высоким содержанием H_2 с заменой 550-650 $Nm^3 H_2$ на тонну DRI, или примерно 70% NG на H_2 на основании топливного числа. Однако это можно сделать только после длительного простоя для модификации существующего оборудования. Оставшиеся 30% топлива установки применяют для питания горелок установки риформинга, но это топливо трудно заменить. Горелки, применяемые в печи, являются чувствительными к молекулярной массе газа, и их трудно потушить, что ограничивает возможность замены топлива в этой области.

В иллюстративном варианте осуществления настоящего изобретения система образования пара добавляет поток непосредственно к технологическому газу. Такое добавление пара обеспечивает возможность непосредственно поддерживать содержание воды в составе сырьевого газа независимо от необходимости удаления пыли из скруббера колошникового газа. При таком включении, настоящее изобретение может свободно изменяться между добавлением малого, среднего и большого количества H_2 в зависимости от его доступности из внешнего источника, в отличие от традиционного способа. Это представлено на фиг. 1 вместе с системой образования пара. Требования к пару: пар низкого давления, 5 бар изб., при температуре $>160^\circ C$. Если доступны любые внешние источники такого пара, система образования пара не требуется. Место на фиг. 1 является предпочтительным местом для добавления пара; ниже по потоку относительно компрессора технологического газа и выше по потоку относительно установки риформинга, но добавление является приемлемым в том случае, если пар добавляют выше по потоку относительно установки риформинга, и он обеспечивает надлежащее перемешивание. В случае этого варианта осуществления добавление пара приводит к обеспечению достаточного количества воды для получения стабильного значения к-фактора даже при добавлениях водорода, превышающих 200 Nm^3 водорода на тонну продукта. Кроме того, регулирование паровых клапанов обеспечивает возможность быстро и точно контролировать содержание воды, чтобы в полной мере использовать изменения доступности H_2 в течение дня.

Для настоящего изобретения требуются дополнительные изменения в конструкции оборудования и требованиях по контролю. В частности, сильным изменениям подвергаются компрессор технологического газа и блок рекуперации тепла. Решения этих проблем уже существуют в данной области техники и заслуживают упоминания в данном изобретении. По мере добавления H_2 реакции восстановления становятся более эндотермическими. При постоянной потребности в энергии для достижения того же качества DRI (металлизации, количества углерода и т.д.) в случае эндотермических реакций с участием H_2 в печи требуется больше физического тепла, чем обычно обеспечивается за счет теплового эффекта реакции в результате реакций восстановления с участием CO. Это означает, что расход восстановительного газа должен увеличиваться по мере добавления H_2 , поскольку температура восстановительного газа ограничена тем, что может выдержать твердый материал (DRI) (как правило, температура $<900^\circ C$ является максимально достижимой температурой слоя, прежде чем образование кластеров станет проблемой). Это, в свою очередь, означает, что компрессор технологического газа должен будет выдерживать больший расход восстановительного газа, а также изменения молекулярной массы технологического газа по мере добавления H_2 в технологическую схему. Кроме того, необходимо также учитывать большие различия между значениями молекулярной массы, особенно при эксплуатации компрессоров центробежного типа. Пар, добавляемый ниже по потоку относительно компрессора технологического газа, уменьшает общую потребность в расходе газа для блока.

На рекуперацию тепла установки влияет уменьшение количества дымового газа из установки риформинга. Основным фактором этого эффекта является то, что по мере добавления внешнего водорода необходимость в риформинге уменьшается. Конечным результатом является то, что расход газообразного топлива (топливного колошникового газа для дожигания и природного газа горелки) уменьшается по мере добавления водорода. Это оказывает большое влияние на количество рекуперированного тепла отработавших газов в блоке рекуперации тепла. Блок рекуперации тепла представляет собой ряд трубчатых теплообменников, каждый из которых характеризуется постоянными значениями коэффициента и площади теплопередачи. По мере уменьшения расхода дымового газа количество рекуперированного тепла отработавших газов также уменьшается, таким образом, вследствие фиксированной геометрии теплопередачи также уменьшается подогрев различных технологических потоков, таких как сырьевой газ. Основное внимание в традиционном способе MIDREX NG и конструкции рекуперации тепла уделяется поддержанию температуры дымовой трубы на уровне $>180^\circ C$, в идеале выше $250^\circ C$, для защиты расположенного ниже по потоку оборудования, такого как вентиляторы горячего воздуха, от неблагоприятного воздействия кислых газов, таких как H_2SO_4 , которые могут образовываться при этих более низких значениях температуры. Это внимание по-прежнему является необходимым, поскольку H_2 добавляют в технологическую схему по мере удаления серы из твердого продукта в способе восстановления, поэтому эти реакции с участием кислых газов все еще могут происходить. Решение проблемы с изменяющимся источником топлива для части оборудования для рекуперации тепла включает обходный путь вокруг индивидуальных пучков или разбавляющий воздух для поддержания надлежащих значений температуры

пучка и дымовой трубы.

Для переходного периода между восстановлением на основе NG и восстановлением на основе H₂ требуется особое внимание, если на существующих установках хотят задействовать снижение выбросов CO₂ за счет внешнего H₂. В данном варианте осуществления учитываются эти типы ограничений способа и оборудования, чтобы в полной мере использовать добавление H₂ в традиционную установку MIDREX NG или подобную. Настоящее изобретение обеспечивает возможность традиционной технологической схеме MIDREX NG или подобной работать с периодической доступностью водорода с возможностью полного перехода на восстановление на основе H₂.

Хотя настоящее изобретение проиллюстрировано и описано в данном изобретении со ссылкой на иллюстративные варианты осуществления и его конкретные примеры, специалистам в данной области техники будет очевидно, что другие варианты осуществления и примеры могут выполнять похожие функции и/или достигать подобных результатов. Все такие эквивалентные варианты осуществления и примеры находятся в пределах сущности и объема настоящего изобретения, и тем самым предполагаются, и при этом могут быть во всех отношениях охвачены следующими не имеющими ограничительного характера пунктами формулы изобретения.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ прямого восстановления, предусматривающий:

добавление посредством отдельных потоков переменных количеств природного газа, водорода и окисляющего газа, не содержащего углерода, к потоку сырьевого газа выше по потоку относительно установки риформинга, предварительный подогрев потока сырьевого газа посредством подогревателя, расположенного выше по потоку относительно установки риформинга;

осуществление риформинга предварительно подогретого потока сырьевого газа в установке риформинга с образованием потока риформинг-газа и

осуществление доставки потока риформинг-газа в шахтную печь, где поток риформинг-газа применяется для восстановления материала на основе металлической руды с получением металлического материала прямого восстановления.

2. Способ прямого восстановления по п.1, где поток сырьевого газа содержит колошниковый газ, рециркулированный из шахтной печи.

3. Способ прямого восстановления по п.2, дополнительно предусматривающий одно или более из мокрой скрубберной очистки и сжатия потока колошникового газа.

4. Способ прямого восстановления по п.1, где окисляющий газ, не содержащий углерода, предусматривает пар.

5. Способ прямого восстановления по п.4, дополнительно предусматривающий регулирование расхода пара для поддержания максимального значения k-фактора потока сырьевого газа на уровне 0,74 или ниже, где x_i представляет собой соответствующий мол.% газа i в составе газа и не включает условия давления в системе:

$$k\text{-фактор} = \frac{x_{CO}x_{H_2}}{x_{H_2O}}$$

6. Способ прямого восстановления по п.1, где переменное количество водорода выбрано для замены 20-90% природного газа на основании топливного числа.

7. Способ прямого восстановления по п.1, где переменное количество водорода выбрано для замены 30-70% природного газа на основании топливного числа.

8. Способ прямого восстановления по п.1, где переменное количество водорода выбрано на основании доступного поступления водорода.

9. Способ прямого восстановления по п.8, где переменное количество водорода выбрано на основании доступного поступления водорода из возобновляемого источника водорода.

10. Система прямого восстановления, содержащая:

источники внешних газов, представляющие собой природный газ, водород и окисляющий газ, не содержащий углерода, средства, выполненные с возможностью добавления посредством отдельных потоков переменных количеств природного газа, водорода и окисляющего газа, не содержащего углерода, к потоку сырьевого газа выше по потоку относительно установки риформинга, выполненной с возможностью осуществления риформинга потока сырьевого газа с образованием потока риформинг-газа,

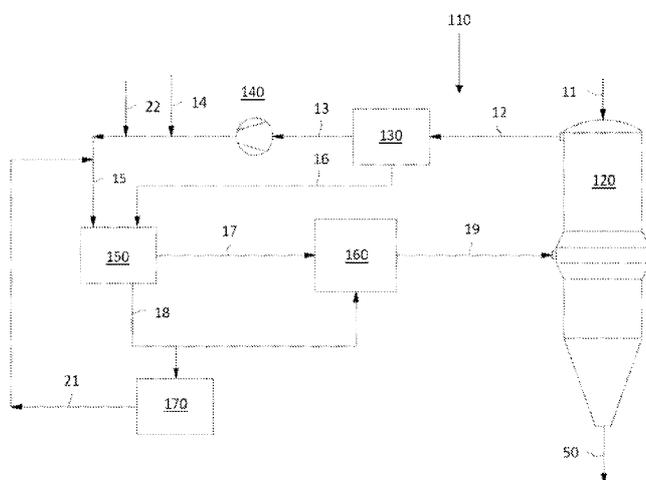
предварительный подогреватель, расположенный выше по потоку относительно установки риформинга и выполненный с возможностью подогрева потока сырьевого газа;

шахтную печь, выполненную с возможностью приема потока риформинг-газа и применения потока риформинг-газа для восстановления материала на основе металлической руды с получением металлического материала прямого восстановления.

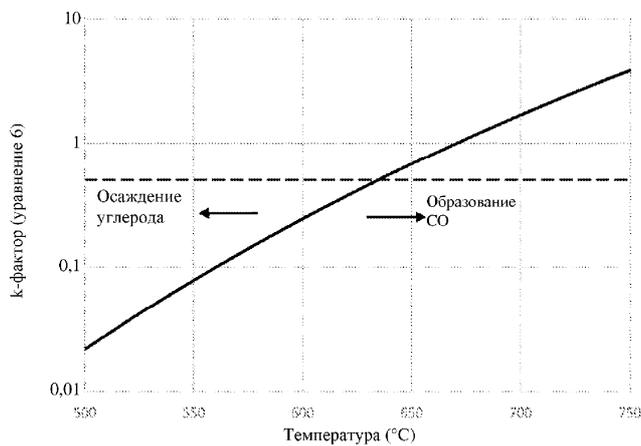
11. Система прямого восстановления по п.10, дополнительно содержащая регулятор расхода, выполненный с возможностью регулирования расхода окисляющего газа, не содержащего углерода, для поддержания максимального значения k-фактора потока сырьевого газа на уровне 0,74 или ниже.

12. Система прямого восстановления по п.10, где переменное количество водорода выбрано для замены 20-90% природного газа на основании топливного числа.

13. Система прямого восстановления по п.10, где переменное количество водорода выбрано на основании доступного поступления водорода.



Фиг. 1



Фиг. 2

