

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **045502**

(13) **B1**

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

(45) Дата публикации и выдачи патента
2023.11.29

(21) Номер заявки
202292716

(22) Дата подачи заявки
2021.03.24

(51) Int. Cl. **C21B 13/00** (2006.01)
C21B 13/02 (2006.01)
C21B 13/14 (2006.01)

(54) **СПОСОБЫ И СИСТЕМЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДА В ЖЕЛЕЗЕ ПРЯМОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ В ПЕЧИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ**

(31) **62/993,771; 17/209,506**

(32) **2020.03.24; 2021.03.23**

(33) **US**

(43) **2023.03.14**

(86) **PCT/US2021/023801**

(87) **WO 2021/195160 2021.09.30**

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

(72) Изобретатель:
Бастоу-Кокс Кейт Маршалл, Астория
Тодд Майкл, Хьюз Грегори Дарел (US)

(74) Представитель:
Кузнецова С.А. (RU)

(56) **US-A1-20170009309**
WO-A1-2001018257
US-A1-20060174941
US-B1-6511629
US-A1-20180119237
US-A1-20020050097
US-A-4118017

(57) Способ производства железа прямого восстановления, имеющего повышенное содержание углерода, включает: обеспечение струи газа с высоким содержанием монооксида углерода и разделение струи газа с высоким содержанием монооксида углерода на по меньшей мере две отдельные струи газа с высоким содержанием монооксида углерода; обеспечение струи газа с высоким содержанием углеводородов и разделение струи газа с высоким содержанием углеводородов на по меньшей мере две отдельные струи газа с высоким содержанием углеводородов; смешивание одной из струй газа с высоким содержанием монооксида углерода с одной из струй газа с высоким содержанием углеводородов с образованием смешанной струи науглероживающего газа; смешивание другой струи газа с высоким содержанием монооксида углерода из по меньшей мере двух отдельных струй газа с высоким содержанием монооксида углерода с другой струей газа с высоким содержанием углеводородов из по меньшей мере двух отдельных струй газа с высоким содержанием углеводородов с образованием отличной смешанной струи науглероживающего газа; доставку каждой из смешанных струй науглероживающего газа, которые имеют разный состав, в переходную зону печи прямого восстановления и подвергание частично или полностью восстановленного оксида железа воздействию смешанных струй науглероживающего газа с повышением содержания углерода в получаемом в результате железе прямого восстановления до более чем 4,5 вес.%.

045502
B1

045502
B1

Перекрестная ссылка на родственную заявку

Изобретение заявляет преимущество приоритета одновременно находящейся на рассмотрении предварительной заявки на патент США № 62/993771, поданной 24 марта 2020 г. и озаглавленной "MID-REX PROCESS UTILIZING EXTENDED ADJUSTABLE CARBON TECHNOLOGY", содержание которой в полном объеме включено в данный документ посредством ссылки.

Область техники

Изобретение в целом относится к областям производства железа прямого восстановления (DRI) и стали. Более конкретно настоящее изобретение относится к способам и системам для повышения содержания углерода в DRI на станции прямого восстановления (DR) и, в частности, к способам и системам прямого восстановления (DR), способным производить углерод в DRI в количестве, превышающем приблизительно 4,5 вес. %.

Уровень техники

Железо прямого восстановления (DRI), которое часто называется губчатым железом, как правило, производят путем введения в реакцию железной руды в реакционноспособной струе газа, содержащей восстановители, такие как H_2 и CO , в подвижном слое или вертикальном шахтном реакторе. Такой продукт DRI может использоваться в качестве источника железа с низким содержанием примесей, в дополнение к скрапу черных металлов и чугуна, при производстве стали главным образом с помощью электродуговой печи (EAF) на станции для производства стали. В EAF происходит расплавление загруженного материала с использованием электрической дуги, как правило, сопровождаемое нагнетанием кислорода с целью сжигания углерода и Fe_3C , представляющих собой примеси, в случае их присутствия. Частичное или полное сжигание углерода с помощью кислорода обеспечивает постоянный внутренний источник энергии для EAF в случае нагнетания кислорода в EAF. Кроме того, превращение Fe_3C в железо и углерод представляет собой экзотермическую реакцию, которая обеспечивает улучшение теплового коэффициента полезного действия EAF. Следовательно, содержание углерода в DRI может быть интерпретировано как источник энергии, и данная энергия в итоге используется в EAF при расплавлении DRI.

Современная технология электродуговой печи (EAF) основана на запасе металлического скрапа или руды класса прямого восстановления (DR) для сведения к минимуму потерь выхода со шлаком. В связи с потенциальным снижением запасов руды руда класса DR может быть ограничена в будущем. Современная EAF производит сталь, которая имеет низкие содержания углерода, обычно менее 0,35 вес. % в углеродистой стали. Это означает, что некоторые установки DR не должны производить большое количество углерода. Если используются источники железа более низкого класса, то увеличенный объем шлака приводит к более высокой потере железа со шлаком, что может неблагоприятно повлиять на общую экономику и эффективность процесса. В будущем может возникнуть необходимость ограничить потерю железа со шлаком путем изменения условий процесса в плавильной печи. Одним из способов достижения этого является создание в плавильной печи более восстановительной среды за счет добавления большего количества углерода в DRI. Современные производители стали постоянно ищут партии железа с высоким содержанием углерода, такие как чугун в чушках или горячий металл из доменной печи, чтобы обеспечить углерод, которым они хотят компенсировать потребление электроэнергии. Углерод в железном сырье для плавильной печи может быть преобразован с использованием методов продувки кислородом при производстве стали для высвобождения тепловой энергии на этапе плавки. Это высвобождение энергии образует CO и некоторое количество CO_2 . Контролируя продувку кислородом, производитель стали может контролировать соотношение CO/CO_2 в атмосфере над расплавленной ванной, чтобы она восстанавливалась до железа. Производитель стали использует эту энергию и химию в плавильной печи, чтобы уменьшить потребление электроэнергии, необходимой для плавки железа без углерода, как в случае со стальным скрапом. В плавильных печах, плавящих стальной скрап, необходимы углеродные блоки для поддержания восстановительной атмосферы в плавильной печи и обеспечения дополнительной энергии для плавки. Партии железа с высоким содержанием углерода являются наиболее желательными, поскольку они обеспечивают наибольшее преимущество в отношении углерода на каждую партию железного материала с высоким содержанием углерода. Это позволяет производителю стали, использующему EAF, максимизировать использование стального скрапа в шихтовом материале плавильной печи. В связи с растущим спросом производителей стали на партии железа с все более и более высоким содержанием углерода возникает необходимость в достижении большего количества углерода в DRI на установке DR.

Углерод может быть добавлен к DRI в рамках процесса DR посредством одной или комбинации из реакций науглероживания внутри противоточного реактора DR. Реакции науглероживания, которые могут использоваться в рамках процесса DR, следующие:

- (1) $2CO \leftrightarrow CO_2 + C(s)$ реакция Будуа;
- (2) $CO + H_2 \leftrightarrow H_2O + C(s)$ реакция вода-углерод;
- (3) $C_n H_{2n+2} \leftrightarrow n + 1 H_2 + nC(s)$ реакция крекинга углеводородов,

и каждая из этих реакций науглероживания катализируется в присутствии металлического железа.

В каждой из реакций науглероживания (1) - (3) получаемая в результате форма углерода может быть графитовым углеродом, как показано в этих уравнениях, или цементитом Fe_3C . Обе формы углерода

присутствуют в продукте DRI из реактора DR.

Как подробно описано в более раннем патенте США № 10508314, также выданном Midrex Technologies, Inc. и озаглавленном "METHODS AND SYSTEMS FOR INCREASING THE CARBON CONTENT OF SPONGE IRON IN A REDUCTION FURNACE", содержание которого включено в настоящую заявку посредством ссылки, современный метод добавления углерода к DRI внутри реактора восстановления представляет собой крекинг углеводородов посредством реакции (3) внутри зоны реактора, называемой переходной зоной. Эта зона расположена чуть ниже области горячего дутья, в которую вводят основной поток восстановительного газа, и которая простирается вниз до верхней части зоны выгрузки или охлаждения реактора DR. Система, предложенная в вышеупомянутом патенте, предназначена для того, чтобы сделать переходную зону более науглероживающей за счет добавления газа с высоким содержанием CO для смешивания с углеводородным газом, обычно природным газом, в результате чего единая струя смешанного газа поступает в переходную зону для создания более науглероживающей и менее эндотермической реакционной среды, тем самым повышая содержание углерода в DRI при сохранении тепловой энергии внутри нисходящей шихты реактора.

Переходная зона в установке по производству железа прямого восстановления с холодной выгрузкой (CDRI) имеет большой потенциал науглероживания из-за большого количества тепловой энергии, сохраняемой в DRI, которую необходимо удалить, прежде чем DRI можно будет выгрузить в атмосферу. В установке по производству CDRI имеется 130-140 ккал/кг энергии DRI, которую необходимо удалить перед выгрузкой. Большая часть этой энергии может быть использована для подпитки реакций крекинга, которые часто используются для науглероживания DRI посредством нагнетания природного газа в переходную зону.

Минимальная температура, которая должна поддерживаться в горячем продукте для возможности последующей обработки, в установке по производству железа прямого восстановления с горячей выгрузкой (HDRI) или горячебрикетированного железа (HBI) значительно выше, чем в установке по производству CDRI. Эти значительно более высокие требования к температуре выгрузки уменьшают доступное тепло в переходной зоне, которое может быть использовано для поддержки науглероживания, до диапазона приблизительно 13,5-18,5 ккал/кг DRI. Это почти в десять раз меньше энергии, чем в установке по производству CDRI. Это важная причина, по которой содержания углерода в установках по производству HDRI и HBI намного ниже, чем в установках по производству CDRI, хотя производителям стали необходимо производить продукты с более высоким содержанием углерода для более эффективной поддержки дальнейшей операции по производству стали.

Соответственно, несмотря на то что предшествующие разработки могут обеспечивать повышение содержания углерода в DRI вплоть до 3,5 вес.%, существуют ограничения, например, ограничения по температуре и равновесию. Для достижения более высоких уровней углерода, достигающих и даже превышающих приблизительно 4,5 вес.%, что является значительным преимуществом, необходимы новые способы и системы. Таким образом, в данной области все еще необходимы способы и системы прямого восстановления (DR), способные производить углерод в DRI в количестве, превышающем приблизительно 4,5 вес.%.

Сущность изобретения

Варианты осуществления настоящего изобретения улучшают предшествующие способы и методы науглероживания DRI, особенно в установках по производству HDRI или HBI. Проблемы, о которых говорилось ранее, сосредоточены на адекватном использовании тепла, доступного внутри переходной зоны, которая является почти адиабатической системой. Только тепловые потери через стенки шахтной печи не позволяют ей быть полностью адиабатической, и эти тепловые потери относительно невелики, так как они попадают в диапазон менее 1% тепловой энергии в переходной зоне.

Этот предыдущий метод, хоть и полезный, может лишь способствовать оптимизации и использованию потенциала науглероживания внутри переходной зоны. Варианты осуществления настоящего изобретения преимущественно обеспечивают еще больший потенциал науглероживания за счет увеличения потенциальных газовых потоков, которые могут быть обработаны внутри переходной зоны, а также увеличения как площади контакта газа с твердым телом при более высокой температуре, так и газохимического профиля для улучшенной науглероживания DRI.

Таким образом, согласно вариантам осуществления в данном документе обеспечены способы и системы прямого восстановления (DR), которые преимущественно способны производить углерод в DRI в количестве, превышающем приблизительно 4,5 вес.%.

Согласно вариантам осуществления в настоящем изобретении обеспечен способ производства железа прямого восстановления, имеющего повышенное содержание углерода. Способ включает: обеспечение струи газа с высоким содержанием монооксида углерода и разделение струи газа с высоким содержанием монооксида углерода на по меньшей мере две отдельные струи газа с высоким содержанием монооксида углерода; обеспечение струи газа с высоким содержанием углеводородов и разделение струи газа с высоким содержанием углеводородов на по меньшей мере две отдельные струи газа с высоким содержанием углеводородов; смешивание одной из струй газа с высоким содержанием монооксида углерода с одной из струй газа с высоким содержанием углеводородов с образованием смешанной струи на-

углероживающего газа; смешивание другой струи газа с высоким содержанием монооксида углерода из по меньшей мере двух отдельных струй газа с высоким содержанием монооксида углерода с другой струей газа с высоким содержанием углеводородов из по меньшей мере двух отдельных струй газа с высоким содержанием углеводородов с образованием отличной смешанной струи науглероживающего газа; доставку каждой из смешанных струй науглероживающего газа, которые имеют разный состав, в переходную зону печи прямого восстановления и подвергание частично или полностью восстановленного оксида железа воздействию смешанных струй науглероживающего газа с повышением содержания углерода в получаемом в результате железе прямого восстановления до более чем приблизительно 4,5 вес.%. Способ может дополнительно включать: разделение струи газа с высоким содержанием монооксида углерода на первую струю газа с высоким содержанием монооксида углерода, вторую струю газа с высоким содержанием монооксида углерода и третью струю газа с высоким содержанием монооксида углерода; разделение струи газа с высоким содержанием углеводородов на первую струю газа с высоким содержанием углеводородов, вторую струю газа с высоким содержанием углеводородов и третью струю газа с высоким содержанием углеводородов; смешивание первой струи газа с высоким содержанием монооксида углерода с первой струей газа с высоким содержанием углеводородов в первом смесителе с образованием первой смешанной струи науглероживающего газа; смешивание второй струи газа с высоким содержанием монооксида углерода со второй струей газа с высоким содержанием углеводородов во втором смесителе с образованием второй смешанной струи науглероживающего газа; смешивание третьей струи газа с высоким содержанием монооксида углерода с третьей струей газа с высоким содержанием углеводородов в третьем смесителе с образованием третьей смешанной струи науглероживающего газа; доставку каждой из первой, второй и третьей смешанных струй науглероживающего газа, которые имеют разные составы, в переходную зону печи прямого восстановления и подвергание частично или полностью восстановленного оксида железа воздействию первой смешанной струи науглероживающего газа, второй смешанной струи науглероживающего газа и третьей смешанной струи науглероживающего газа с повышением содержания углерода в получаемом в результате железе прямого восстановления до более чем приблизительно 4,5 вес.%. Обеспечение струи газа с высоким содержанием монооксида углерода может включать первоначальное обеспечение одной струи газа, подвергнутого риформингу, из установки риформинга, и струю газа с высоким содержанием монооксида углерода направляют из блока извлечения монооксида углерода, который образует часть струи газа с высоким содержанием монооксида углерода и выходящую струю газа с высоким содержанием H_2 . Переходная зона может содержать множество ярусов равной высоты внутри переходной зоны, и каждый ярус содержит компоновку форсунок, и при этом каждую из смешанных струй науглероживающего газа вводят в отдельный ярус переходной зоны через компоновку форсунок на каждом ярусе. Форсунки, вводящие смешанную струю науглероживающего газа на каждом ярусе, могут быть размещены в виде периферического кольца с равным количеством форсунок, расположенных в нижней части каждого яруса. Периферическое кольцо может содержать от приблизительно 16 до 28 форсунок. Форсунки могут быть оснащены индивидуальными клапанами или оснащены коллекторными клапанами с не более чем 4 форсунками на каждый коллектор. Форсунки можно выключать или включать, а также координировать для максимизации площади контакта с самым горячим DRI. Каждая из смешанных струй науглероживающего газа может быть введена в отдельный ярус переходной зоны с меняющимся составом для каждого яруса с использованием отдельного смесителя для каждого яруса. Каждая из смешанных струй науглероживающего газа может быть предварительно нагрета до разных температур для каждого яруса с использованием отдельного устройства для предварительного нагрева. Температуры предварительного нагрева могут находиться в диапазоне от температуры окружающей среды до 400°C. Каждая из смешанных струй науглероживающего газа может иметь разный состав. Переходная зона может содержать множество ярусов, расположенных друг над другом вертикально, и каждую из смешанных струй науглероживающего газа вводят в отдельный ярус. Общая высота переходной зоны, которая обычно имеет высоту в диапазоне 1,0-3,0 м, будет увеличена более чем на 0,5 м, например, до высоты 1,5-3,5 м, с обеспечением достаточного объема для эффективной реализации компоновки ярусов.

Также согласно вариантам осуществления шахтная печь прямого восстановления содержит: зону восстановления; переходную зону, при этом переходная зона имеет несколько ярусов, расположенных друг над другом вертикально, и каждый ярус выполнен с возможностью приема отдельного потока смешанной струи науглероживающего газа; и зону охлаждения, расположенную под переходной зоной, при этом восстановленное железо частично или полностью подвергается воздействию смешанных струй науглероживающего газа для повышения содержания углерода в получаемом в результате железе прямого восстановления до более чем приблизительно 4,5 вес.%. Переходная зона может содержать множество ярусов равной высоты внутри переходной зоны, и каждый ярус содержит компоновку форсунок, и при этом печь выполнена с возможностью приема каждой из смешанных струй науглероживающего газа в отдельном ярусе переходной зоны через компоновку форсунок на каждом ярусе. Форсунки на каждом ярусе могут быть выполнены в виде периферического кольца с равным количеством форсунок, расположенных в нижней части каждого яруса. Периферическое кольцо может содержать от приблизительно 16 до 28 форсунок. Форсунки могут быть оснащены индивидуальными клапанами или оснащены коллек-

торными клапанами с не более чем 4 форсунками на каждый коллектор. Печь может быть выполнена с возможностью приема каждой из смешанных струй науглероживающего газа, вводимых в отдельный ярус переходной зоны с меняющимся составом. Каждый ярус может содержать разный состав, и общая высота переходной зоны, которая обычно имеет высоту в диапазоне 1,0-3,0 м, будет увеличена более чем на 0,5 м, например, до высоты 1,5-3,5 м, с обеспечением достаточного объема для эффективной реализации компоновки ярусов.

Краткое описание графических материалов

Настоящее изобретение проиллюстрировано и описано в данном документе со ссылкой на различные графические материалы, на которых подобные номера ссылок используют для обозначения подобных компонентов системы/узла/этапов способа при необходимости, и на которых:

на фиг. 1 показано схематическое изображение, иллюстрирующее один примерный вариант осуществления процесса прямого восстановления (DR) согласно настоящему изобретению для повышения содержания углерода в DRI, в котором скоординированные смеси науглероживающего газа вводят в шахтную печь прямого восстановления в расширенной области переходной зоны через периферическую систему нагнетания газа с тремя смесителями и тремя ярусами;

на фиг. 2 показано схематическое изображение, иллюстрирующее еще один примерный вариант осуществления процесса прямого восстановления (DR) согласно настоящему изобретению для повышения содержания углерода в DRI, в котором скоординированные смеси науглероживающего газа вводят в шахтную печь прямого восстановления в расширенной области переходной зоны через периферическую систему нагнетания газа с тремя смесителями, тремя устройствами для предварительного нагрева и тремя ярусами;

на фиг. 3 показано схематическое изображение, иллюстрирующее дополнительный примерный вариант осуществления процесса прямого восстановления (DR) согласно настоящему изобретению для повышения содержания углерода в DRI, в котором скоординированные смеси науглероживающего газа вводят в шахтную печь прямого восстановления в расширенной области переходной зоны через периферическую систему нагнетания газа с двумя смесителями и двумя ярусами; и

на фиг. 4 показано схематическое изображение, иллюстрирующее еще один примерный вариант осуществления процесса прямого восстановления (DR) согласно настоящему изобретению для повышения содержания углерода в DRI, в котором скоординированные смеси науглероживающего газа вводят в шахтную печь прямого восстановления в расширенной области переходной зоны через периферическую систему нагнетания газа с двумя смесителями, двумя устройствами для предварительного нагрева и двумя ярусами.

Подробное описание изобретения

Варианты осуществления настоящего изобретения преимущественно улучшают предшествующие способы и системы для повышения содержания углерода в железе прямого восстановления (DRI). Например, в некоторых предшествующих методиках с единственной периферической системой нагнетания, расположенной в нижней части переходной зоны, куда вводят всю смесь науглероживающего газа, науглероживающий газ быстро проходит от внешних стенок реактора и объединяется, создавая единый столб восходящего газа в центре реактора. Эти геометрия/процесс, которые раскрыты в упомянутом выше описании патента США № 10508314 и теперь также часто упоминаются как регулируемая технология получения углерода (ACT), хоть и полезны, могут быть улучшены, особенно в отношении реакционной системы, поскольку газ имеет ограниченную теплопередающую площадь контакта и площадь поверхности науглероживания металла. Методом нагнетания в переходной зоне является введение углеводородного газа через минимальное количество (~8) форсунок, сгруппированных попарно, расположенных на расстоянии 90° друг от друга. Эти форсунки подают газ, который фактически контактирует с очень небольшой частью общей площади зоны. Это может привести к локальному переохлаждению, которое может затормозить кинетику реакций науглероживания в этой струе нагнетания.

В данном документе было определено, что с практической точки зрения нецелесообразно просто увеличить количество форсунок по периферии. Газы переходной зоны вводят в реактор DR через фурмы, проходящие сквозь огнеупорную стенку реактора. Эти фурмы находятся в контакте с тепловым излучением самой шихты, температура которой составляет приблизительно 700-860°C, или подвергаются его воздействию. Система ограничена тем, насколько большой общий поток газа может нагнетаться в реактор, из-за требования сохранять большую часть тепловой энергии, уже имеющейся внутри шихты. Простое увеличение количества форсунок по периферии для увеличения площади контакта потребует одной из двух регулировок, ни одна из которых не является целесообразной. Первая заключается в увеличении количества форсунок при том же размере. Это создало бы значительное падение массовой скорости внутри каждой форсунки, что тем самым вызвало бы более сильный нагрев форсунки. Более горячие распылители форсунки приводят к преждевременной активации реакций науглероживания внутри форсунки, что приводит к закупорке форсунки. Вторая заключается в увеличении количества форсунок и уменьшении их диаметра для поддержания адекватной скорости охлаждения внутри форсунки, что приводит к тому, что диаметры форсунок слишком малы, и они закупориваются металлургическими частичками железа всякий раз, когда форсунки не должны работать, а реактор работает.

Таким образом, варианты осуществления настоящего изобретения преимущественно улучшают предшествующие способы и методы науглероживания DRI, особенно в установках по производству HDRI или HBI. Проблемы, о которых говорилось ранее, сосредоточены на адекватном использовании тепла, доступного внутри переходной зоны, которая является почти адиабатической системой. Только тепловые потери через стенки шахтной печи не позволяют ей быть полностью адиабатической, и эти тепловые потери относительно невелики, так как они попадают в диапазон менее 1% тепловой энергии в переходной зоне.

Этот предыдущий метод, хоть и полезный, может лишь способствовать оптимизации и использованию потенциала науглероживания внутри переходной зоны. Варианты осуществления настоящего изобретения преимущественно обеспечивают еще больший потенциал науглероживания за счет увеличения потенциальных газовых потоков, которые могут быть обработаны внутри переходной зоны, а также увеличения как площади контакта газа с твердым телом при более высокой температуре, так и газохимического профиля для улучшенного науглероживания DRI.

Например и как дополнительно объясняется ниже, варианты осуществления настоящего изобретения предпочтительно обеспечивают удлиненную/расширенную переходную зону, которая на приблизительно 0,5 м больше длины печи под областью горячего дутья; высота переходной зоны, которая обычно имеет высоту в диапазоне 1,0-3,0 м, будет увеличена более чем на 0,5 м, чтобы обеспечить дополнительный объем, необходимый для поддержки системы нагнетания газа с несколькими ярусами для повышения науглероживания. Газ с высоким содержанием CO из блока с АСТ направляется на по меньшей мере два или три яруса смесителей газа. Таким образом, упомянутая выше регулируемая технология получения углерода (АСТ), то есть процесс, который создает струю с высоким содержанием CO и смешивает ее, например, с природным газом, частично улучшена для использования нескольких точек нагнетания в расширенную переходную зону согласно вариантам осуществления. Упомянутые выше смесители контролируются по соотношению, чтобы обеспечить скоординированное соотношение смешивания газа с высоким содержанием CO и углеводородного газа. Каждый ярус имеет оптимизированное соотношение газовой смеси. Верхний ярус имеет более высокое содержание углеводородов, так как температурный профиль здесь более высокий, и крекинг углеводородов более активен в более высоком температурном режиме, приблизительно 800-850°C. Нижний ярус представляет собой газовую смесь с намного более высоким содержанием CO, поскольку экзотермический характер реакций науглероживания CO делает их более предпочтительными при более низком температурном режиме, приблизительно 700-750°C. Центральный ярус оптимизирован для более сбалансированного соотношения между реакциями CO и реакциями крекинга, поскольку он работает в температурной зоне между двумя другими, приблизительно 750-800°C. Ярусная система нагнетания газа с независимыми смесителями обеспечивает возможность того, что профилированное применение хим. состава газов соответствует температурному профилю.

Более того, согласно вариантам осуществления каждый ярус нагнетания газа тогда состоит из полного периферического набора форсунок (оптимально 16-28 форсунок на каждый ярус), которые проходят сквозь стенку шахтной печи для введения газа в переходную зону. Каждое кольцо форсунок расположено в нижней части того сегмента переходной зоны, который оно обслуживает. Противоточный характер работы шахтной печи делает это оптимальным расположением для каждого кольца форсунок для каждого яруса реакций. Форсунки на каждом кольце оснащены клапанами индивидуально или через вспомогательные коллекторы, обслуживающие не более чем 4 форсунки на каждый коллектор. Это позволяет выборочно вводить газ, нагнетаемый на любом уровне, в конкретном секторе на периферии переходной зоны или по всей периферии, если это необходимо. Выборочное добавление газов в конкретных секторах переходной зоны может обеспечить дополнительный контроль температурного профиля для реакций, а также более точный контроль температуры выгрузки из переходной зоны для достижения рабочей цели для установки.

Таким образом, согласно вариантам осуществления реализован способ производства железа прямого восстановления с использованием уникальной и скоординированной компоновки струй газа с высоким содержанием CO и с высоким содержанием углеводородов с конкретными составами газа и температурными профилями для производства железа прямого восстановления с содержанием углерода более 4,5 вес.%. Например, согласно вариантам осуществления, используя расширенную переходную зону и систему нагнетания науглероживающего газа с несколькими ярусами, можно контролировать условия реакции вдоль длины переходной зоны для оптимизации желаемых реакций науглероживания. Каждый из ярусов может иметь периферическую компоновку форсунок, оснащенных независимыми или вспомогательными коллекторными клапанами, для дальнейшей оптимизации площади контакта и температурного профиля переходной зоны. Такие способы и системы обеспечивают трехмерную схему контроля, предназначенную для обеспечения гибкости в работе и оптимизации согласно вариантам осуществления.

Соответственно, преимущественно достигается цель вариантов осуществления настоящего изобретения по контролю газового и температурного профиля для повышения потенциала науглероживания без нарушения при этом требований к минимальной температуре выгрузки, присущих установкам DR по производству HDRI и HBI.

Со ссылкой далее конкретно на фиг. 1 в одном примерном варианте осуществления процесс 20 со-

гласно настоящему изобретению включает прохождение струи 1 синтез-газа или газа, подвергнутого риформингу, через блок С с АСТ с целью отделения СО от остальной части синтез-газа/газа, подвергнутого риформингу. Следует отметить, что струя 1 газа, подвергнутого риформингу, получена из блока установки риформинга (не показан) любой конструкции, такой как установка каталитического риформинга (например, установка риформинга трубчатого типа), установка некаталитического риформинга (например, реактор частичного окисления), или даже комбинированная установка риформинга (например, установка автотермического риформинга или двухступенчатая установка риформинга), или любой другой блок генерирования восстановительного газа, способный производить газ, содержащий СО, с относительно высоким соотношением СО/СО₂, с приближением его температуры до температуры окружающей среды. Необязательный охладитель/холодильник (не показан) также может быть использован, как дополнительно описано ниже. Предпочтительно струя 1 газа, подвергнутого риформингу, содержит по меньшей мере 20,0 мол.% СО.

Как дополнительно показано на фиг. 1, струя 1 газа, подвергнутого риформингу, поступает в блок С с АСТ. Как отмечено выше, геометрия/процесс регулируемой технологии получения углерода (АСТ) раскрыты в упомянутом выше патенте США № 10508314, содержание которого включено в данный документ посредством ссылки, и варианты осуществления настоящего изобретения улучшают эту технологию, как описано в данном документе. Соответственно, элементы блока С с АСТ будут кратко описаны ниже. Обычно в блоке С с АСТ может использоваться упомянутый выше охладитель/холодильник. В охладителе/холодильнике может использоваться прямое контактное охлаждение, не прямое контактное охлаждение, охлаждение с помощью холодильной установки и т. д. В ходе охлаждения газ, подвергнутой риформингу, может терять некоторое количество воды, содержащейся в нем, что, в свою очередь, улучшает потенциал науглероживания газа, подвергнутого риформингу. Холодный/сухой газ, подвергнутой риформингу, необязательно протекает через компрессор, который может повышать его давление (например, до 15 бар изб.), поскольку большинство способов разделения/адсорбции работают наиболее эффективно при более высоких значениях давления. В ходе сжатия газ теряет еще большее количество воды, что приводит к еще сильнее улучшенному потенциалу науглероживания. После необязательного регулирования температуры сжатый газ протекает в систему мембранных модулей для извлечения СО. Также может быть использован любой другой вид блока/механизма извлечения СО, такой как PSA/VPSA/TSA, охлаждение с помощью холодильной установки и т. д.

Струя 13 с высоким содержанием Н₂ (отведенный газ из блока извлечения СО блока С с АСТ) может быть направлена обратно, например, в качестве рецикла, подлежащего использованию на любом участке в технологическом контуре, например, использованию в разных частях установки DR в качестве топлива, охлаждающего газа, синтез-газа или технологического газа, или она может быть выведена на другую станцию.

Струя 2 с высоким содержанием СО, выходящая из блока С с АСТ, проходит к узлу 15, который делит поток на первую струю 7 с высоким содержанием СО, вторую струю 8 с высоким содержанием СО и третью струю 9 с высоким содержанием СО, и поступает в три отдельных смесителя газа, то есть первый смеситель D газа, второй смеситель E газа и третий смеситель F газа соответственно, как показано на фиг. 1 и дополнительно описано ниже.

Газ с повышенным содержанием углеводородов (газ с высоким содержанием углеводородов, например, природный газ) вводят посредством струи 3 газа с высоким содержанием углеводородов, которая поделена на три независимо контролируемые струи, то есть первую струю 4 газа с высоким содержанием углеводородов, вторую струю 5 газа с высоким содержанием углеводородов и третью струю 6 газа с высоким содержанием углеводородов, проходящие также в смесители D, E и F газа соответственно, как показано на фиг. 1.

Следует дополнительно отметить, что необязательно если струя 3 газа с высоким содержанием углеводородов является влажной, то один или более блоков поглощения влаги (не показаны) можно использовать для осушения газа с подавлением реакций обезуглероживания. Необязательно, если струя 3 с высоким содержанием углеводородов содержит значительное количество соединений серы, то блок обессеривания (не показан) можно использовать для снижения и контроля количества общего содержания серы, например, до уровня ниже 100 ppm.

Первую струю 4 газа с высоким содержанием углеводородов, вторую струю 5 газа с высоким содержанием углеводородов и третью струю 6 газа с высоким содержанием углеводородов смешивают с первой струей 7 с высоким содержанием СО, второй струей 8 с высоким содержанием СО и третьей струей 9 с высоким содержанием СО соответственно перед введением в печь A DR.

Полученные в результате смешанные струи науглероживающего газа, каждая из которых имеет скоординированный состав на основе контроля соотношения этапов смесителя газа, выходят из смесителей D, E и F газа в качестве первой смешанной струи 12 науглероживающего газа, второй смешанной струи 11 науглероживающего газа и третьей смешанной струи 10 науглероживающего газа соответственно.

Как дополнительно показано на фиг. 1, первую смешанную струю 12 науглероживающего газа, вторую смешанную струю 11 науглероживающего газа и третью смешанную струю 10 науглероживающего

газа затем вводят в переходную зону В печи А через периферический набор форсунок, расположенный в нижней части каждого яруса переходной зоны В, содержащей первый ярус, второй ярус и третий ярус, то есть ярусы В-1, В-2 и В-3 соответственно, как показано на фиг. 1. Каждая из форсунок оснащена индивидуальным клапаном или оснащена клапаном благодаря вспомогательной коллекторной компоновке, в которой сгруппированы предпочтительно не более чем 4 форсунки на каждый вспомогательный коллектор. Это обеспечивает контроль химического и температурного профиля, что позволяет повысить потенциал науглероживания переходной зоны В от максимальных 3,5 вес.% углерода в DRI на основе традиционных принципов с АСТ до более чем 4,5 вес.% углерода в DRI. Более конкретно согласно вариантам осуществления каждый ярус нагнетания газа состоит из полного периферического набора (кольца) 30, 32, 34 форсунок соответственно (оптимально 16-28 форсунок на каждый ярус), которые проходят сквозь стенку шахтной печи для введения газа в переходную зону В. Каждое кольцо 30, 32, 34 форсунок расположено в нижней части того сегмента переходной зоны В, который оно обслуживает. Противоточный характер работы шахтной печи А делает это оптимальным расположением для каждого кольца 30, 32, 34 форсунок для каждого яруса реакций. Форсунки на каждом кольце оснащены клапанами индивидуально или через вспомогательные коллекторы, обслуживающие не более чем 4 форсунки на каждый коллектор. Это позволяет выборочно вводить газ, нагнетаемый на любом уровне, в конкретном секторе на периферии переходной зоны В или по всей периферии, если это необходимо. Выборочное добавление газов в конкретных секторах переходной зоны В может обеспечить дополнительный контроль температурного профиля для реакций, а также более точный контроль температуры выгрузки из переходной зоны В для достижения рабочей цели для установки.

Со ссылкой далее на фиг. 2 в еще одном примерном варианте осуществления процесс 22 согласно настоящему изобретению включает прохождение струи 1 синтез-газа или газа, подвергнутого риформингу, через блок С с АСТ с целью отделения СО от остальной части синтез-газа/газа, подвергнутого риформингу. Следует отметить, что струя 1 газа, подвергнутого риформингу, получена из блока установки риформинга (не показан) любой конструкции, такой как установка каталитического риформинга (например, установка риформинга трубчатого типа), установка некаталитического риформинга (например, реактор частичного окисления), или даже комбинированная установка риформинга (например, установка автотермического риформинга или двухступенчатая установка риформинга), или любой другой блок генерирования восстановительного газа, способный производить газ, содержащий СО, с относительно высоким соотношением СО/СО₂, с приближением его температуры до температуры окружающей среды. Необязательный охладитель/холодильник (не показан) также может быть использован, как дополнительно описано ниже. Предпочтительно струя 1 газа, подвергнутого риформингу, содержит по меньшей мере 20,0 мол.% СО.

Как дополнительно показано на фиг. 2, струя 1 газа, подвергнутого риформингу, поступает в блок С с АСТ. Как отмечено выше, геометрия/процесс регулируемой технологии получения углерода (АСТ) раскрыты в упомянутом выше патенте США № 10508314, и варианты осуществления настоящего изобретения улучшают эту технологию, как описано в данном документе. Соответственно, элементы блока С с АСТ будут кратко описаны ниже. Обычно в блоке С с АСТ может использоваться упомянутый выше охладитель/холодильник. В охладителе/холодильнике может использоваться прямое контактное охлаждение, не прямое контактное охлаждение, охлаждение с помощью холодильной установки и т. д. В ходе охлаждения газ, подвергнутый риформингу, может терять некоторое количество воды, содержащейся в нем, что, в свою очередь, улучшает потенциал науглероживания газа, подвергнутого риформингу. Холодный/сухой газ, подвергнутый риформингу, необязательно протекает через компрессор, который может повышать его давление (например, до 15 бар изб.), поскольку большинство способов разделения/адсорбции работают наиболее эффективно при более высоких значениях давления. В ходе сжатия газ теряет еще большее количество воды, что приводит к еще сильнее улучшенному потенциалу науглероживания. После необязательного регулирования температуры сжатый газ протекает в систему мембранных модулей для извлечения СО. Также может быть использован любой другой вид блока/механизма извлечения СО, такой как PSA/VPSA/TSA, охлаждение с помощью холодильной установки и т. д.

Струя 13 с высоким содержанием Н₂ (отведенный газ из блока извлечения СО блока С с АСТ) может быть направлена обратно, например, в качестве рецикла, подлежащего использованию на любом участке в технологическом контуре, например, использованию в разных частях установки DR в качестве топлива, охлаждающего газа, синтез-газа или технологического газа, или она может быть выведена на другую станцию.

Струя 2 с высоким содержанием СО, выходящая из блока С с АСТ, проходит к узлу 15, который делит поток на первую струю 7 с высоким содержанием СО, вторую струю 8 с высоким содержанием СО и третью струю 9 с высоким содержанием СО, и поступает в три отдельных смесителя газа, то есть первый смеситель D газа, второй смеситель E газа и третий смеситель F газа соответственно, как показано на фиг. 2 и дополнительно описано ниже.

Газ с повышенным содержанием углеводородов (газ с высоким содержанием углеводородов, например, природный газ) вводят посредством струи 3 газа с высоким содержанием углеводородов, которая поделена на три независимо контролируемые струи, то есть первую струю 4 газа с высоким содержа-

нием углеводородов, вторую струю 5 газа с высоким содержанием углеводородов и третью струю 6 газа с высоким содержанием углеводородов, проходящие также в смесители D, E и F газа соответственно, как показано на фиг. 2.

Следует дополнительно отметить, что необязательно если струя 3 газа с высоким содержанием углеводородов является влажной, то один или более блоков поглощения влаги (не показаны) можно использовать для осушения газа с подавлением реакций обезуглероживания. Необязательно, если струя 3 с высоким содержанием углеводородов содержит значительное количество соединений серы, то блок обессеривания (не показан) можно использовать для снижения и контроля количества общего содержания серы, например, до уровня ниже 100 ppm.

Первую струю 4 газа с высоким содержанием углеводородов, вторую струю 5 газа с высоким содержанием углеводородов и третью струю 6 газа с высоким содержанием углеводородов смешивают с первой струей 7 с высоким содержанием CO, второй струей 8 с высоким содержанием CO и третьей струей 9 с высоким содержанием CO соответственно перед введением в печь A DR.

Полученные в результате смешанные струи науглероживающего газа, каждая из которых имеет скоординированный состав на основе контроля соотношения этапов смесителя газа, выходят из смесителей D, E и F газа в качестве первой смешанной струи 12 науглероживающего газа, второй смешанной струи 11 науглероживающего газа и третьей смешанной струи 10 науглероживающего газа соответственно.

Как дополнительно показано на фиг. 2, первую смешанную струю 12 науглероживающего газа, вторую смешанную струю 11 науглероживающего газа и третью смешанную струю 10 науглероживающего газа затем вводят в переходную зону В печи А через периферический набор форсунок, расположенный в нижней части каждого яруса переходной зоны В, содержащей первый ярус, второй ярус и третий ярус, то есть ярусы В-1, В-2 и В-3 соответственно, как показано на фиг. 2. Каждая из форсунок оснащена индивидуальным клапаном или оснащена клапаном благодаря вспомогательной коллекторной компоновке, в которой сгруппированы предпочтительно не более чем 4 форсунки на каждый вспомогательный коллектор. Это обеспечивает контроль химического и температурного профиля, что позволяет повысить потенциал науглероживания переходной зоны В от максимальных 3,5 вес.% углерода в DRI на основе традиционных принципов с АСТ до более чем 4,5 вес.% углерода в DRI. Более конкретно согласно вариантам осуществления каждый ярус нагнетания газа состоит из полного периферического набора (кольца) 30, 32, 34 форсунок соответственно (оптимально 16-28 форсунок на каждый ярус), которые проходят сквозь стенку шахтной печи для введения газа в переходную зону В. Каждое кольцо 30, 32, 34 форсунок расположено в нижней части того сегмента переходной зоны В, который оно обслуживает. Противоточный характер работы шахтной печи А делает это оптимальным расположением для каждого кольца 30, 32, 34 форсунок для каждого яруса реакций. Форсунки на каждом кольце оснащены клапанами индивидуально или через вспомогательные коллекторы, обслуживающие не более чем 4 форсунки на каждый коллектор. Это позволяет выборочно вводить газ, нагнетаемый на любом уровне, в конкретном секторе на периферии переходной зоны В или по всей периферии, если это необходимо. Выборочное добавление газов в конкретных секторах переходной зоны В может обеспечить дополнительный контроль температурного профиля для реакций, а также более точный контроль температуры выгрузки из переходной зоны В для достижения рабочей цели для установки.

Преимущественно в этом примерном варианте осуществления и как дополнительно показано на фиг. 2, контроль температурного профиля для переходной зоны В дополнительно улучшается с прохождением каждой из смесей науглероживающего газа, т. е. первой смешанной струи 12 науглероживающего газа, второй смешанной струи 11 науглероживающего газа и третьей смешанной струи 10 науглероживающего газа, через независимо контролируемые устройства для предварительного нагрева, например, первое устройство G для предварительного нагрева, второе устройство H для предварительного нагрева и третье устройство I для предварительного нагрева соответственно, как показано на фиг. 2, для предварительного нагрева до подходящих и желаемых температур при необходимости. Это обеспечивает гибкость добавления газа подходящей температуры в надлежащий ярус внутри системы нагнетания науглероживающего газа.

Со ссылкой далее на фиг. 3 в дополнительном примерном варианте осуществления процесс 24 согласно настоящему изобретению включает прохождение струи 1 синтез-газа или газа, подвергнутого риформингу, через блок С с АСТ с целью отделения CO от остальной части синтез-газа/газа, подвергнутого риформингу. Следует отметить, что струя 1 газа, подвергнутого риформингу, получена из блока установки риформинга (не показан) любой конструкции, такой как установка каталитического риформинга (например, установка риформинга трубчатого типа), установка некаталитического риформинга (например, реактор частичного окисления), или даже комбинированная установка риформинга (например, установка автотермического риформинга или двухступенчатая установка риформинга), или любой другой блок генерирования восстановительного газа, способный производить газ, содержащий CO, с относительно высоким соотношением CO/CO₂, с приближением его температуры до температуры окружающей среды. Необязательный охладитель/холодильник (не показан) также может быть использован, как дополнительно описано ниже. Предпочтительно струя 1 газа, подвергнутого риформингу, содержит по меньшей мере

20,0 мол.% CO.

Как дополнительно показано на фиг. 3, струя 1 газа, подвергнутого риформингу, поступает в блок С с АСТ. Как отмечено выше, геометрия/процесс регулируемой технологии получения углерода (АСТ) раскрыты в упомянутом выше патенте США № 10508314, и варианты осуществления настоящего изобретения улучшают эту технологию, как описано в данном документе. Соответственно, элементы блока С с АСТ будут кратко описаны ниже. Обычно в блоке С с АСТ может использоваться упомянутый выше охладитель/холодильник. В охладителе/холодильнике может использоваться прямое контактное охлаждение, не прямое контактное охлаждение, охлаждение с помощью холодильной установки и т. д. В ходе охлаждения газ, подвергнутый риформингу, может терять некоторое количество воды, содержащейся в нем, что, в свою очередь, улучшает потенциал науглероживания газа, подвергнутого риформингу. Холодный/сухой газ, подвергнутый риформингу, необязательно протекает через компрессор, который может повышать его давление (например, до 15 бар изб.), поскольку большинство способов разделения/адсорбции работают наиболее эффективно при более высоких значениях давления. В ходе сжатия газ теряет еще большее количество воды, что приводит к еще сильнее улучшенному потенциалу науглероживания. После необязательного регулирования температуры сжатый газ протекает в систему мембранных модулей для извлечения CO. Также может быть использован любой другой вид блока/механизма извлечения CO, такой как PSA/VPSA/TSA, охлаждение с помощью холодильной установки и т. д.

Струя 13 с высоким содержанием H₂ (отведенный газ из блока извлечения CO блока С с АСТ) может быть направлена обратно, например, в качестве рецикла, подлежащего использованию на любом участке в технологическом контуре, например, использованию в разных частях установки DR в качестве топлива, охлаждающего газа, синтез-газа или технологического газа, или она может быть выведена на другую станцию.

Струя 2 с высоким содержанием CO, выходящая из блока С с АСТ, проходит к узлу 15, который делит поток на первую струю 7 с высоким содержанием CO и третью струю 9 с высоким содержанием CO, и поступает в два отдельных смесителя газа, то есть первый смеситель D газа и третий смеситель F газа соответственно, как показано на фиг. 3 и дополнительно описано ниже.

Газ с повышенным содержанием углеводов (газ с высоким содержанием углеводов, например, природный газ) вводят посредством струи 3 газа с высоким содержанием углеводов, которая поделена на две независимо контролируемые струи, то есть первую струю 4 газа с высоким содержанием углеводов и третью струю 6 газа с высоким содержанием углеводов, проходящие также в смесители D и F газа соответственно, как показано на фиг. 3.

Следует дополнительно отметить, что необязательно если струя 3 газа с высоким содержанием углеводов является влажной, то один или более блоков поглощения влаги (не показаны) можно использовать для осушения газа с подавлением реакций обезуглероживания. Необязательно, если струя 3 с высоким содержанием углеводов содержит значительное количество соединений серы, то блок обессеривания (не показан) можно использовать для снижения и контроля количества общего содержания серы, например, до уровня ниже 100 ppm.

Первую струю 4 газа с высоким содержанием углеводов и третью струю 6 газа с высоким содержанием углеводов смешивают с первой струей 7 с высоким содержанием CO и третьей струей 9 с высоким содержанием CO соответственно перед введением в печь A DR.

Полученные в результате смешанные струи науглероживающего газа, каждая из которых имеет скоординированный состав на основе контроля соотношения этапов смесителя газа, выходят из смесителей D и F газа в качестве первой смешанной струи 12 науглероживающего газа и третьей смешанной струи 10 науглероживающего газа соответственно.

Как дополнительно показано на фиг. 3, первую смешанную струю 12 науглероживающего газа и третью смешанную струю 10 науглероживающего газа затем вводят в переходную зону В печи А через периферический набор форсунок, расположенный в нижней части каждого яруса переходной зоны В, содержащей два яруса, то есть ярусы В-1' и В-2' соответственно, как показано на фиг. 3. Каждая из форсунок оснащена индивидуальным клапаном или оснащена клапаном благодаря вспомогательной коллекторной компоновке, в которой сгруппированы предпочтительно не более чем 4 форсунки на каждый вспомогательный коллектор. Это обеспечивает контроль химического и температурного профиля, что позволяет повысить потенциал науглероживания переходной зоны В от максимальных 3,5 вес.% углерода в DRI на основе традиционных принципов с АСТ до более чем 4,5 вес.% углерода в DRI. Более конкретно согласно вариантам осуществления каждый ярус нагнетания газа состоит из полного периферического набора (кольца) 30', 34' форсунок соответственно (оптимально 16-28 форсунок на каждый ярус), которые проходят сквозь стенку шахтной печи для введения газа в переходную зону В. Каждое кольцо 30', 34' форсунок расположено в нижней части того сегмента переходной зоны В, который оно обслуживает. Противоточный характер работы шахтной печи А делает это оптимальным расположением для каждого кольца 30', 34' форсунок для каждого яруса реакций. Форсунки на каждом кольце оснащены клапанами индивидуально или через вспомогательные коллекторы, обслуживающие не более чем 4 форсунки на каждый коллектор. Это позволяет выборочно вводить газ, нагнетаемый на любом уровне, в конкретном секторе на периферии переходной зоны В или по всей периферии, если это необходимо. Выбо-

рочное добавление газов в конкретных секторах переходной зоны В может обеспечить дополнительный контроль температурного профиля для реакций, а также более точный контроль температуры выгрузки из переходной зоны В для достижения рабочей цели для установки.

Со ссылкой далее на фиг. 4 в еще одном дополнительном примерном варианте осуществления процесс 26 согласно настоящему изобретению включает прохождение струи 1 синтез-газа или газа, подвергнутого риформингу, через блок С с АСТ с целью отделения СО от остальной части синтез-газа/газа, подвергнутого риформингу. Следует отметить, что струя 1 газа, подвергнутого риформингу, получена из блока установки риформинга (не показан) любой конструкции, такой как установка каталитического риформинга (например, установка риформинга трубчатого типа), установка некаталитического риформинга (например, реактор частичного окисления), или даже комбинированная установка риформинга (например, установка автотермического риформинга или двухступенчатая установка риформинга), или любой другой блок генерирования восстановительного газа, способный производить газ, содержащий СО, с относителем высоким соотношением СО/СО₂, с приближением его температуры до температуры окружающей среды. Необязательный охладитель/холодильник (не показан) также может быть использован, как дополнительно описано ниже. Предпочтительно струя 1 газа, подвергнутого риформингу, содержит по меньшей мере 20,0 мол.% СО.

Как дополнительно показано на фиг. 4, струя 1 газа, подвергнутого риформингу, поступает в блок С с АСТ. Как отмечено выше, геометрия/процесс регулируемой технологии получения углерода (АСТ) раскрыты в упомянутом выше патенте США № 10508314, и варианты осуществления настоящего изобретения улучшают эту технологию, как описано в данном документе. Соответственно, элементы блока С с АСТ будут кратко описаны ниже. Обычно в блоке С с АСТ может использоваться упомянутый выше охладитель/холодильник. В охладителе/холодильнике может использоваться прямое контактное охлаждение, не прямое контактное охлаждение, охлаждение с помощью холодильной установки и т. д. В ходе охлаждения газ, подвергнутый риформингу, может терять некоторое количество воды, содержащейся в нем, что, в свою очередь, улучшает потенциал науглероживания газа, подвергнутого риформингу. Холодный/сухой газ, подвергнутый риформингу, необязательно протекает через компрессор, который может повышать его давление (например, до 15 бар изб.), поскольку большинство способов разделения/адсорбции работают наиболее эффективно при более высоких значениях давления. В ходе сжатия газ теряет еще большее количество воды, что приводит к еще сильнее улучшенному потенциалу науглероживания. После необязательного регулирования температуры сжатый газ протекает в систему мембранных модулей для извлечения СО. Также может быть использован любой другой вид блока/механизма извлечения СО, такой как PSA/VPSA/TSA, охлаждение с помощью холодильной установки и т. д.

Струя 13 с высоким содержанием Н₂ (отведенный газ из блока извлечения СО блока С с АСТ) может быть направлена обратно, например, в качестве рецикла, подлежащего использованию на любом участке в технологическом контуре, например, использованию в разных частях установки DR в качестве топлива, охлаждающего газа, синтез-газа или технологического газа, или она может быть выведена на другую станцию.

Струя 2 с высоким содержанием СО, выходящая из блока С с АСТ, проходит к узлу 15, который делит поток на первую струю 7 с высоким содержанием СО и третью струю 9 с высоким содержанием СО, и поступает в два отдельных смесителя газа, то есть первый смеситель D газа и третий смеситель F газа соответственно, как показано на фиг. 4 и дополнительно описано ниже.

Газ с повышенным содержанием углеводородов (газ с высоким содержанием углеводородов, например, природный газ) вводят посредством струи 3 газа с высоким содержанием углеводородов, которая поделена на две независимо контролируемые струи, то есть первую струю 4 газа с высоким содержанием углеводородов и третью струю 6 газа с высоким содержанием углеводородов, проходящие также в смесители D и F газа соответственно, как показано на фиг. 4.

Следует дополнительно отметить, что необязательно если струя 3 газа с высоким содержанием углеводородов является влажной, то один или более блоков поглощения влаги (не показаны) можно использовать для осушения газа с подавлением реакций обезуглероживания. Необязательно, если струя 3 с высоким содержанием углеводородов содержит значительное количество соединений серы, то блок обессеривания (не показан) можно использовать для снижения и контроля количества общего содержания серы, например, до уровня ниже 100 ppm.

Первую струю 4 газа с высоким содержанием углеводородов и третью струю 6 газа с высоким содержанием углеводородов смешивают с первой струей 7 с высоким содержанием СО и третьей струей 9 с высоким содержанием СО соответственно перед введением в печь А DR.

Полученные в результате смешанные струи науглероживающего газа, каждая из которых имеет скоординированный состав на основе контроля соотношения этапов смесителя газа, выходят из смесителей D и F газа в качестве первой смешанной струи 12 науглероживающего газа и третьей смешанной струи 10 науглероживающего газа соответственно.

Как дополнительно показано на фиг. 4, первую смешанную струю 12 науглероживающего газа и третью смешанную струю 10 науглероживающего газа затем вводят в переходную зону В печи А через периферический набор (кольцо) форсунок, расположенный в нижней части каждого яруса переходной

зоны В, содержащей два яруса, то есть ярусы В-1' и В-2' соответственно, как показано на фиг. 4. Каждая из форсунок оснащена индивидуальным клапаном или оснащена клапаном благодаря вспомогательной коллекторной компоновке, в которой сгруппированы предпочтительно не более чем 4 форсунки на каждый вспомогательный коллектор. Это обеспечивает контроль химического и температурного профиля, что позволяет повысить потенциал науглероживания переходной зоны В от максимальных 3,5 вес.% углерода в DRI на основе традиционных принципов с АСТ до более чем 4,5 вес.% углерода в DRI. Более конкретно согласно вариантам осуществления каждый ярус нагнетания газа состоит из полного периферического набора 30', 34' форсунок соответственно (оптимально 16-28 форсунок на каждый ярус), которые проходят сквозь стенку шахтной печи для введения газа в переходную зону В. Каждое кольцо 30', 34' форсунок расположено в нижней части того сегмента переходной зоны В, который оно обслуживает. Противоточный характер работы шахтной печи А делает это оптимальным расположением для каждого кольца 30', 34' форсунок для каждого яруса реакций. Форсунки на каждом кольце оснащены клапанами индивидуально или через вспомогательные коллекторы, обслуживающие не более чем 4 форсунки на каждый коллектор. Это позволяет выборочно вводить газ, нагнетаемый на любом уровне, в конкретном секторе на периферии переходной зоны В или по всей периферии, если это необходимо. Выборочное добавление газов в конкретных секторах переходной зоны В может обеспечить дополнительный контроль температурного профиля для реакций, а также более точный контроль температуры выгрузки из переходной зоны В для достижения рабочей цели для установки.

Преимущественно в этом примерном варианте осуществления и как дополнительно показано на фиг. 4, контроль температурного профиля для переходной зоны В дополнительно улучшается с прохождением каждой из смесей науглероживающего газа, т. е. первой смешанной струи 12 науглероживающего газа и третьей смешанной струи 10 науглероживающего газа, через независимо контролируемые устройства для предварительного нагрева, например, первое устройство G для предварительного нагрева и третье устройство I для предварительного нагрева соответственно, как показано на фиг. 4, для предварительного нагрева до подходящих и желаемых температур при необходимости. Это обеспечивает гибкость добавления газа подходящей температуры в надлежащий ярус внутри системы нагнетания науглероживающего газа.

Преимущественно, как показано на каждой из фиг. 1-4, оксид железа поступает в верхнюю часть печи А. Частично или полностью восстановленный оксид железа может быть, таким образом, подвергнут воздействию вышеописанных струй с высоким содержанием СО и с высоким содержанием углеводородов согласно вариантам осуществления.

Как дополнительно преимущественно показано на каждой из фиг. 1-4, основная зона восстановления/область 36 горячего дутья, где происходит большая часть восстановления, показана в печи А над переходной зоной В. Переходная зона В простирается от нижней части основной зоны восстановления/области 36 горячего дутья до верхней части зоны 38 охлаждения, включая ярусы, расположенные друг над другом вертикально, как дополнительно показано на фиг. 1-4, и является тем местом, где принимают смешанные газы и происходит дальнейшее восстановление. Переходная зона В преимущественно образует расширенную переходную зону (увеличенную в длину под областью горячего дутья) в печи, как дополнительно объяснялось выше. Следует отметить, что смешанные газы не принимаются в зоне 38 охлаждения согласно вариантам осуществления. Следует дополнительно отметить, что обычно частично или полностью восстановленный оксид железа в переходной зоне В и/или зоне 38 охлаждения сначала содержит от 0,0 вес.% до 3,0 вес.% химически связанного углерода, однако используя вышеописанную переходную зону В с несколькими ярусами, расположенными друг над другом вертикально, как показано на фиг. 1-4, можно преимущественно достичь содержания углерода в полученном в результате DRI более приблизительно 4,5 вес.%.

Хотя настоящее изобретение проиллюстрировано и описано в данном документе со ссылкой на конкретные и предпочтительные варианты осуществления и его конкретные примеры, специалистам в данной области будет очевидно, что другие варианты осуществления и примеры могут выполнять подобные функции и/или с их помощью можно достичь подобных результатов. Все такие эквивалентные варианты осуществления и примеры находятся в пределах сущности и объема настоящего изобретения, тем самым предполагаются и предназначены для охвата следующими не имеющими ограничительного характера пунктами формулы изобретения. Более того, все признаки, элементы и варианты осуществления, описанные в данном документе, могут использоваться в любых комбинациях.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ производства железа прямого восстановления, имеющего повышенное содержание углерода, включающий:

обеспечение струи газа с высоким содержанием монооксида углерода и разделение струи газа с высоким содержанием монооксида углерода на по меньшей мере две отдельные струи газа с высоким содержанием монооксида углерода;

обеспечение струи газа с высоким содержанием углеводородов и разделение струи газа с высоким содержанием углеводородов на по меньшей мере две отдельные струи газа с высоким содержанием углеводородов;

смешивание одной из струй газа с высоким содержанием монооксида углерода с одной из струй газа с высоким содержанием углеводородов с образованием смешанной струи науглероживающего газа;

смешивание другой струи газа с высоким содержанием монооксида углерода из по меньшей мере двух отдельных струй газа с высоким содержанием монооксида углерода с другой струей газа с высоким содержанием углеводородов из по меньшей мере двух отдельных струй газа с высоким содержанием углеводородов с образованием отличной смешанной струи науглероживающего газа;

доставку каждой из смешанных струй науглероживающего газа, которые имеют разный состав, в переходную зону печи прямого восстановления и подвергание частично или полностью восстановленного оксида железа воздействию смешанных струй науглероживающего газа с повышением содержания углерода в получаемом в результате железе прямого восстановления до более чем приблизительно 4,5 вес. %.

2. Способ по п.1, отличающийся тем, что дополнительно включает:

разделение струи газа с высоким содержанием монооксида углерода на первую струю газа с высоким содержанием монооксида углерода, вторую струю газа с высоким содержанием монооксида углерода и третью струю газа с высоким содержанием монооксида углерода;

разделение струи газа с высоким содержанием углеводородов на первую струю газа с высоким содержанием углеводородов, вторую струю газа с высоким содержанием углеводородов и третью струю газа с высоким содержанием углеводородов;

смешивание первой струи газа с высоким содержанием монооксида углерода с первой струей газа с высоким содержанием углеводородов в первом смесителе с образованием первой смешанной струи науглероживающего газа;

смешивание второй струи газа с высоким содержанием монооксида углерода со второй струей газа с высоким содержанием углеводородов во втором смесителе с образованием второй смешанной струи науглероживающего газа;

смешивание третьей струи газа с высоким содержанием монооксида углерода с третьей струей газа с высоким содержанием углеводородов в третьем смесителе с образованием третьей смешанной струи науглероживающего газа;

доставку каждой из первой, второй и третьей смешанных струй науглероживающего газа, которые имеют разные составы, в переходную зону печи прямого восстановления и подвергание частично или полностью восстановленного оксида железа воздействию первой смешанной струи науглероживающего газа, второй смешанной струи науглероживающего газа и третьей смешанной струи науглероживающего газа с повышением содержания углерода в получаемом в результате железе прямого восстановления до более чем приблизительно 4,5 вес. %.

3. Способ по п.1, отличающийся тем, что обеспечение струи газа с высоким содержанием монооксида углерода включает первоначальное обеспечение одной струи газа, подвергнутого риформингу, из установки риформинга, и струю газа с высоким содержанием монооксида углерода направляют из блока извлечения монооксида углерода, который образует часть струи газа с высоким содержанием монооксида углерода и выходящую струю газа с высоким содержанием H_2 .

4. Способ по п.1, отличающийся тем, что переходная зона содержит множество ярусов равной высоты внутри переходной зоны, и каждый ярус содержит компоновку форсунок, и при этом каждую из смешанных струй науглероживающего газа вводят в отдельный ярус переходной зоны через компоновку форсунок на каждом ярусе.

5. Способ по п.4, отличающийся тем, что форсунки, вводящие смешанную струю науглероживающего газа на каждом ярусе, размещают в виде периферического кольца с равным количеством форсунок, расположенных в нижней части каждого яруса.

6. Способ по п.5, отличающийся тем, что периферическое кольцо содержит от приблизительно 16 до 28 форсунок.

7. Способ по п.6, отличающийся тем, что форсунки оснащают индивидуальными клапанами или оснащают коллекторными клапанами с не более чем 4 форсунками на каждый коллектор.

8. Способ по п.4, отличающийся тем, что каждую из смешанных струй науглероживающего газа вводят в отдельный ярус переходной зоны с меняющимся составом для каждого яруса с использованием

отдельного смесителя для каждого яруса.

9. Способ по п.4, отличающийся тем, что каждая из смешанных струй науглероживающего газа может быть предварительно нагрета до разных температур для каждого яруса с использованием отдельного устройства для предварительного нагрева, причем температуры предварительного нагрева могут находиться в диапазоне от температуры окружающей среды до 400°C.

10. Способ по п.1, отличающийся тем, что переходная зона содержит множество ярусов, расположенных друг над другом вертикально, и каждую из смешанных струй науглероживающего газа вводят в отдельный ярус.

11. Способ по п.1, отличающийся тем, что общую высоту переходной зоны увеличивают более чем на 0,5 м до высоты 1,5-3,5 м.

12. Шахтная печь прямого восстановления для использования в способе по любому из пп.1-11, содержащая:

зону восстановления;

переходную зону, при этом переходная зона имеет несколько ярусов, расположенных друг над другом вертикально, и каждый ярус выполнен с возможностью приема отдельного потока смешанной струи науглероживающего газа,

при этом поток смешанной струи науглероживающего газа содержит смесь струи газа с высоким содержанием монооксида углерода и струи газа с высоким содержанием углеводородов; и

зону охлаждения, расположенную под переходной зоной, при этом восстановленное железо частично или полностью подвергается воздействию смешанных струй науглероживающего газа для повышения содержания углерода в получаемом в результате железе прямого восстановления шахтной печи прямого восстановления до более чем приблизительно 4,5 вес.%.

13. Шахтная печь прямого восстановления по п.12, отличающаяся тем, что переходная зона содержит множество ярусов равной высоты внутри переходной зоны, и каждый ярус содержит компоновку форсунок, и при этом печь выполнена с возможностью приема каждой из смешанных струй науглероживающего газа в отдельном ярусе переходной зоны через компоновку форсунок на каждом ярусе.

14. Шахтная печь прямого восстановления по п.13, отличающаяся тем, что форсунки на каждом ярусе выполнены в виде периферического кольца с равным количеством форсунок, расположенных в нижней части каждого яруса.

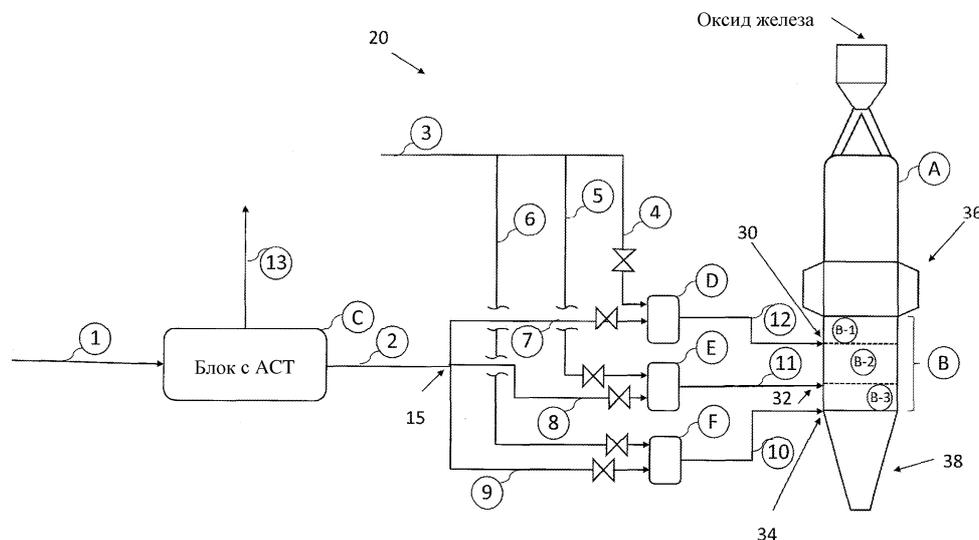
15. Шахтная печь прямого восстановления по п.14, отличающаяся тем, что периферическое кольцо содержит от приблизительно 16 до 28 форсунок.

16. Шахтная печь прямого восстановления по п.15, отличающаяся тем, что форсунки оснащены индивидуальными клапанами или оснащены коллекторными клапанами с не более чем 4 форсунками на каждый коллектор.

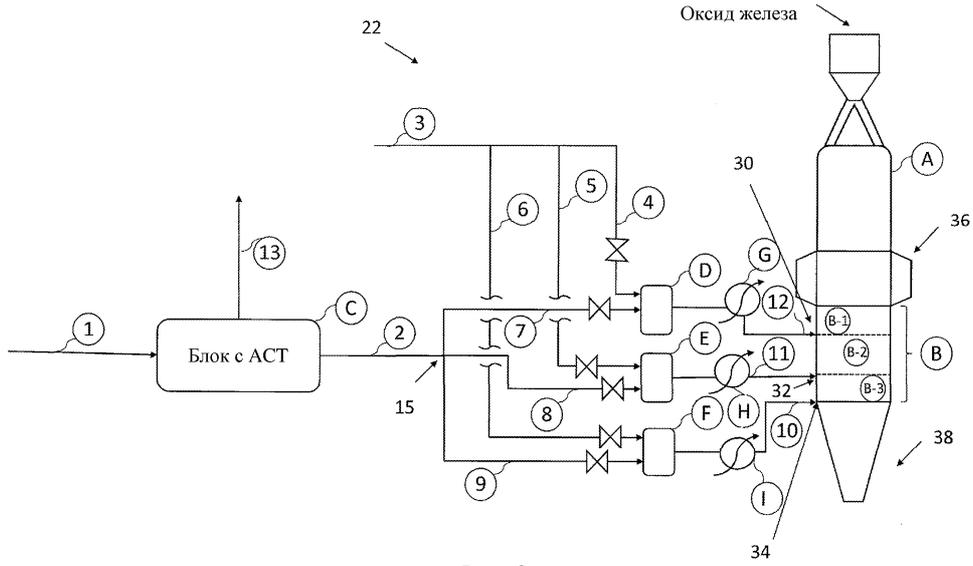
17. Шахтная печь прямого восстановления по п.12, отличающаяся тем, что печь выполнена с возможностью приема каждой из смешанных струй науглероживающего газа, вводимых в отдельный ярус переходной зоны с меняющимся составом.

18. Шахтная печь прямого восстановления по п.12, отличающаяся тем, что каждый ярус содержит поток смешанной струи науглероживающего газа с разным составом.

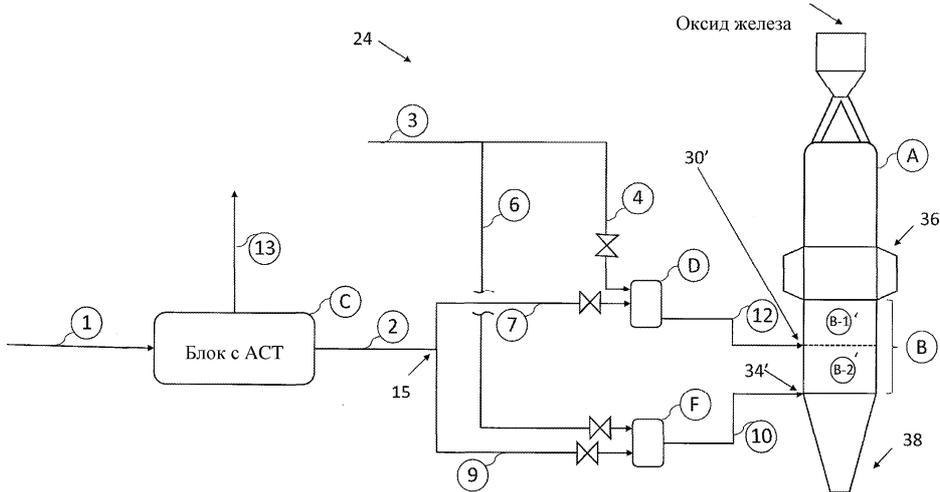
19. Шахтная печь прямого восстановления по п.17, отличающаяся тем, что общая высота переходной зоны увеличивается более чем на 0,5 м до высоты 1,5-3,5 м.



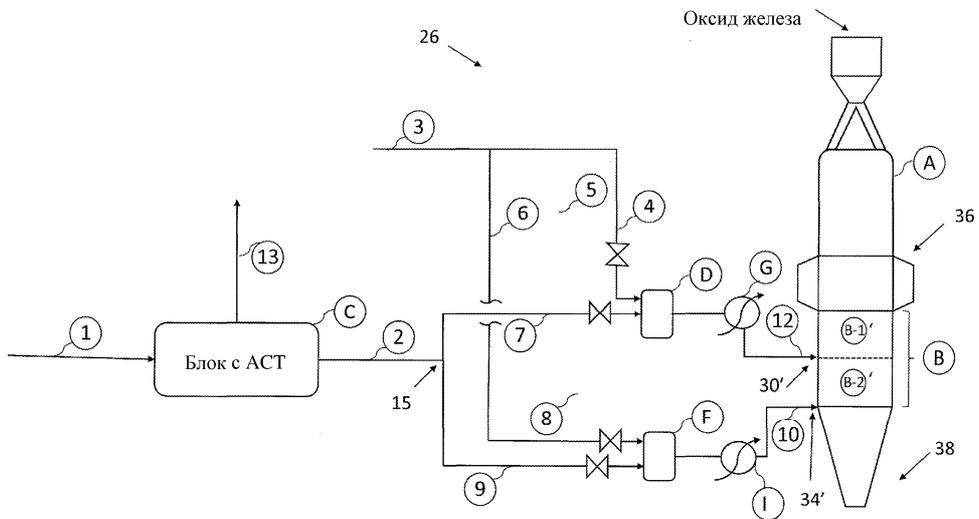
Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4

