

(19)



**Евразийское  
патентное  
ведомство**

(21) **202392953** (13) **A1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ**

(43) Дата публикации заявки  
**2024.03.08**

(51) Int. Cl. **C21B 5/06** (2006.01)  
**C21B 5/00** (2006.01)  
**C21B 9/14** (2006.01)

(22) Дата подачи заявки  
**2022.06.02**

(54) **СПОСОБ ЭКСПЛУАТАЦИИ УСТАНОВКИ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ**

(31) **LU500245**

(72) Изобретатель:

(32) **2021.06.03**

**Кинцель Клаус Петер, Касс Жиль  
(LU), Валериус Мириам (DE)**

(33) **LU**

(86) **PCT/EP2022/065003**

(74) Представитель:

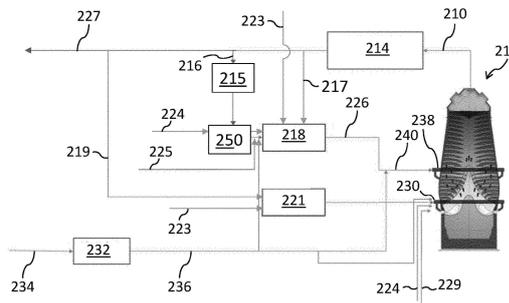
(87) **WO 2022/253938 2022.12.08**

**Веселицкий М.Б., Кузенкова Н.В.,  
Каксис Р.А., Белоусов Ю.В., Куликов  
А.В., Кузнецова Е.В., Соколов Р.А.,  
Кузнецова Т.В. (RU)**

(71) Заявитель:

**ПАУЛЬ ВЮРТ С.А. (LU)**

(57) Способ эксплуатации доменной печи, включающий в себя шаги: а) сбор потока доменного газа из доменной печи, имеющей шахту и по меньшей мере одну фурму, б) подача потока доменного газа и углеводородсодержащего газа в установку риформинга, включающую в себя по меньшей мере один риформер, в) риформинг потока доменного газа и углеводородсодержащего газа в установке риформинга для получения потока сингаза, и г) подача по меньшей мере части потока сингаза в доменную печь, причем к углеводородсодержащему газу перед шагом (в) и/или к потоку доменного газа перед шагом (в) и/или к смеси, состоящей из доменного газа и углеводородсодержащего газа, перед шагом (в) и/или к потоку сингаза перед шагом (г) добавляют поток H<sub>2</sub>, и причем подача по меньшей мере части потока сингаза в доменную печь происходит через шахту доменной печи, причем эффективность утилизации водорода в установке доменной печи, включающей в себя доменную печь, установку риформинга и кауперную установку, составляет более 60%.



**A1**

**202392953**

**202392953**

**A1**

## СПОСОБ ЭКСПЛУАТАЦИИ УСТАНОВКИ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

5 Область техники

В общем, настоящее изобретение относится к способу эксплуатации установки доменной печи, а также к такой установке доменной печи.

Уровень техники

10 Несмотря на альтернативные способы, такие как плавление лома или прямое восстановление в электродуговой печи, доменная печь в настоящее время все еще представляет собой наиболее широко используемый процесс производства стали. Одной из проблем доменной печи является выходящий из колошника доменной печи доменный газ (ДПГ), обычно называемый "колошниковым газом". Хотя ранее этому газу могли позволить просто  
15 улетучиваться в атмосферу, впоследствии этого удалось избежать, используя его на питающихся ДПГ электростанциях, чтобы не растрчивать содержащуюся в газе энергию и не создавать излишнюю нагрузку на окружающую среду. Одним из компонентов доменного газа является  $\text{CO}_2$ , который вреден для окружающей среды и в основном бесполезен для промышленного применения.

20 Действительно, выходящий из питаемой доменным газом электростанции, отработанный газ содержит обычно концентрацию  $\text{CO}_2$  от 20 до 40 % по объему. Сжигаемый в доменной печи газ, помимо упомянутого выше  $\text{CO}_2$ , обычно содержит значительное количество  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{H}_2$ . Однако содержание  $\text{N}_2$  в значительной степени зависит от того, используется ли в доменной печи горячий  
25 воздух или (чистый) кислород.

В основном для того, чтобы уменьшить количество используемого кокса или других источников углерода, было предложено извлекать доменный газ из доменной печи, обрабатывать его для повышения его восстановительного потенциала, и вводить обратно в доменную печь для содействия процессу  
30 восстановления. Одним из способов такой обработки является снижение содержания  $\text{CO}_2$  в доменном газе с помощью адсорбции под давлением (PSA) или вакуумной адсорбции под давлением (VPSA), как, например, раскрыто в патентной заявке EP 2886666 A1. Хотя PSA/VPSA - установки позволяют значительно снизить содержание  $\text{CO}_2$  в доменном газе с примерно 40% до

примерно 5%, они очень дороги в приобретении, обслуживании и эксплуатации, а также требуют много места.

Также было предложено использовать доменный газ в качестве агента риформинга углеводородов для получения синтез-газа (также называемого сингазом), который может быть использован в различных промышленных целях. Согласно предложенному процессу риформинга, доменный газ смешивается с углеводородным газом, содержащим по меньшей мере один углеводород (например, низшие алканы). В так называемой реакции сухого риформинга углеводороды газа реагируют с  $\text{CO}_2$  в доменном газе с образованием  $\text{H}_2$  и  $\text{CO}$ . В то же время, углеводороды реагируют с  $\text{H}_2\text{O}$  в доменном газе с образованием  $\text{H}_2$  и  $\text{CO}$  в так называемой реакции парового риформинга.

В контексте сокращения выбросов  $\text{CO}_2$  также прилагаются значительные усилия для уменьшения использования углеродистого топлива для работы самой доменной печи. В качестве замены используется топливо с повышенным содержанием водорода в виде углеводородов, газообразного водорода  $\text{H}_2$  или их смеси. Водород и углеводороды, обладая высокой теплотворной способностью, могут впрыскиваться в фурму доменной печи в качестве вспомогательного топлива. Чем выше доля водорода в газе в заплечиках и шахтном газе, тем, как правило, выше потенциал снижения выбросов  $\text{CO}_2$  в доменную печь. "Газ в заплечиках" обычно соответствует газу в когезионной зоне доменной печи, а "шахтный газ" в данном контексте соответствует газу, закачиваемому в шахту доменной печи, то есть выше когезионной зоны.

Однако впрыск холодного  $\text{H}_2$  и/или углеводородов на уровне фурмы/через фурму вместе с большим количеством пылевидного угля (угольной пыли) (PCI) приводит к значительному снижению RAFT (температуры адиабатического пламени в гоночном тракте). Для увеличения RAFT требуется более высокое обогащение кислородом, которое ограничивается температурой колошникового газа. Поэтому через фурмы в доменную печь может быть введено лишь относительно небольшое количество холодного  $\text{H}_2$  и/или углеводородов, что ограничивает потенциал экономии  $\text{CO}_2$  данной технологии.

Впрыск горячего водорода или даже впрыск горячих углеводородов, таких как природный газ, на уровне фурмы/через фурму может обеспечить более высокую степень утилизации водорода, а также более высокую экономию  $\text{CO}_2$  из доменной печи. Однако производство горячего водорода и особенно горячих

углеводородов не является технически простым, поскольку углеводороды склонны к растрескиванию при более высоких температурах, а сталь склонна к обезуглероживанию при контакте с горячим водородом, что делает сталь склонной к расслоению.

5 Однако при закачке углеводородов и/или водорода в доменную печь только часть водорода используется в доменной печи для восстановления железной руды, а остальная часть покидает установку доменной печи с колошниковым газом, что еще больше ограничивает преимущества закачки водорода и/или углеводородов. Процент потребления водорода в доменной печи ухудшается при  
10 увеличении количества водорода в доменной печи в результате впрыска углеводородов и/или водорода. Это означает, что потенциал снижения выбросов  $\text{CO}_2$  для данного количества водорода уменьшается при использовании все большего количества водорода в доменной печи.

Последний пункт особенно проблематичен, когда закачиваемый в  
15 доменную печь водород представляет собой возобновляемый водород, получаемый из электроэнергии с помощью процесса электролиза. Фактически, использование части выходящего из доменной печи доменного газа в тепловой электростанции обычно приводит к низкому тепловому КПД, составляющему примерно 25-35%. Это означает, что от 65 до 75% энергии этой части доменного  
20 газа теряется при использовании для производства электроэнергии. Таким образом очевидно, что, особенно в случае использования в установке доменной печи дорогих источников энергии с низким содержанием углерода, таких как водород, следует по возможности избегать использования доменного газа для производства электроэнергии.

25 Техническая проблема

Таким образом, целью настоящего изобретения является создание нового способа эксплуатации доменной печи, а также соответствующей установки доменной печи, позволяющей эффективно использовать водород в установке доменной печи, сократить выбросы  $\text{CO}_2$  при традиционном доменном  
30 производстве стали и, по меньшей мере, частично преодолеть вышеупомянутые проблемы.

Эта цель достигнута посредством способа по п.п. 1 и 2 формулы изобретения и установки доменной печи по п. 19 формулы изобретения.

### Общее описание изобретения

Для достижения указанной цели настоящее изобретение предлагает, в первом аспекте, способ эксплуатации доменной печи, включающий в себя шаги:

5 сбор потока доменного газа из доменной печи, имеющей шахту и по меньшей мере одну фурму,  
подача потока доменного газа и углеводородсодержащего газа на установку риформинга, включающую в себя по меньшей мере один риформер,  
10 риформинг потока доменного газа и углеводородсодержащего газа в установке риформинга для получения потока сингаза, и  
подача, по меньшей мере, части потока сингаза в доменную печь.

К углеводородсодержащему газу перед шагом (в) и/или к потоку доменного газа перед шагом (в) и/или к смеси, состоящей из доменного газа и углеводородсодержащего газа, перед шагом (в) и/или к потоку сингаза перед шагом (г) добавляют поток  $H_2$ . Добавление  $H_2$  осуществляют с целью увеличения количества вводимого (то есть, подаваемого) в доменную печь  $H_2$ . Способ  
15 согласно изобретению не включает в себя шаг удаления  $H_2$ . Подача, по меньшей мере, части потока сингаза в доменную печь происходит на уровне шахты/через шахту доменной печи. Также возможно, что подача, по меньшей мере, части потока сингаза в доменную печь происходит на уровне фурмы/через фурму  
20 доменной печи или как через шахту доменной печи, так и через фурму доменной печи. Другими словами, в некоторых вариантах осуществления изобретения часть потока сингаза подается на уровне шахты, а другая часть потока сингаза одновременно подается через фурму доменной печи, в то время как в других вариантах осуществления изобретения подача части потока сингаза происходит  
25 только через шахту доменной печи.

В некоторых вариантах осуществления изобретения дополнительный поток водорода и/или углеводородов может быть добавлен в фурму доменной печи.

Хотя этот способ можно применить и для производства других металлов, например свинца или меди, доменная печь обычно используется для  
30 производства чугуна.

В контексте настоящего изобретения сингаз относится к синтез-газу, полученному в результате процесса риформинга в риформере.

В контексте настоящего изобретения установка риформинга включает в себя по меньшей мере один риформер. В вариантах осуществления изобретения

установка риформинга может включать множество риформеров, расположенных последовательно или параллельно друг другу, или установка риформинга может включать множество риформеров, расположенных с образованием по меньшей мере двух серий риформеров, причем по меньшей мере две серии риформеров  
5 расположены параллельно друг другу. Риформеры установки риформинга могут быть любого типа, например регенеративным риформером или каталитическим сухим и/или мокрым риформером любого типа, прежде всего с нижним, боковым, террасовым или верхним обжигом. В вариантах осуществления изобретения, когда установка риформинга включает в себя более одного  
10 риформера, риформеры могут быть идентичными или отличаться друг от друга. Установка риформинга может, например, состоять из предварительного и основного риформинга. Точное количество, тип и расположение риформеров в установке риформинга может быть выгодным образом изменено в зависимости от уровня последующей подачи полученного сингаза в доменную печь для  
15 выполнения требований к полученному сингазу (например, температуры, степени восстановления) или в зависимости от позиции добавления водорода.

Для того чтобы процесс риформинга происходил в установке риформинга, углекислый газ и пар, например собранный доменный газ, и углеводородсодержащий газ должны быть объединены (то есть, смешаны) для  
20 образования газовой смеси до или после подвода в реакционную камеру первого риформинга установки риформинга. В вариантах осуществления изобретения, когда установка риформинга включает в себя только один риформер, первый риформер соответствует этому риформеру.

Подвергающийся риформингу в реакторе газ представляет собой газовую смесь доменного газа и углеводородсодержащего газа, а также, возможно, пара, которая может быть более или менее хорошо перемешана. Объединение доменного газа с углеводородсодержащим газом и, возможно, паром в общем случае означает "позволить доменному газу смешиваться с углеводородным газом и, возможно, паром". Это может включать (активное) перемешивание  
25 доменного газа с углеводородсодержащим газом и, возможно, паром, то есть приложение механической силы для смешивания газов. Однако в некоторых случаях может быть достаточно, например, ввести газы в трубу, чтобы смешивание происходило более или менее пассивно за счет конвекции и/или диффузии. При этом следует понимать, что химическая реакция усиливается при  
30

более высокой степени смешивания. Возможно, что газы объединяются и смешиваются в специальном сосуде, который может называться смесительным сосудом или смесительной камерой. В вариантах осуществления изобретения также может быть достаточным отдельно вводить доменный газ,

5 углеводородсодержащий газ и, возможно, пар в риформер и позволить газам смешиваться внутри риформера, например в предварительной камере риформера.

В одном из аспектов настоящее изобретение также предлагает способ эксплуатации установки доменной печи путем повышения эффективности  
10 утилизации водорода. Способ включает в себя комбинацию добавления  $H_2$  в доменную печь с реакцией риформинга, причем часть утилизации водорода в установке доменной печи, включающей в себя доменную печь, установку риформинга и кауперную установку, составляет более 60% от водорода, подаваемого в доменную печь, и предпочтительно более 65% от водорода,  
15 подаваемого в доменную печь, причем подаваемый в доменную печь водород составляет общий поток по меньшей мере  $200 \text{ Nm}^3/\text{t}$  произведенного горячего металла, из которого по меньшей мере  $50 \text{ Nm}^3/\text{t}$  горячего металла подается в установку доменной печи в виде молекулярного водорода  $H_2$ .

Утилизация водорода определяется как: (подвод водорода в установку  
20 доменной печи - отвод водорода из установки доменной печи)/(подвод водорода в установку доменной печи).

Подводимый в доменную печь водород, или подаваемый в доменную печь водород, или подводимый в установку доменной печи водород, определяется как общее содержание водорода в газе в заплечиках (то есть, газе в когезионной зоне  
25 доменной печи) и в шахтном газе, подаваемом в доменную печь на уровне шахты. Этот подводимый в доменную печь водород, включает в себя, прежде всего, водород, содержащийся в сингазе, в инжестируемом молекулярном водороде  $H_2$ , в других водородсодержащих газах, в инжестируемом угле и/или смоле, во влажности инжестируемых газов и твердого топлива и во влажности  
30 горячего дутья.

Отвод водорода определяется как количество водорода, содержащегося в доменном газе, выходящем из доменной печи в верхней ее части, за вычетом его утилизации в кауперной установке и, если применимо, в установке риформинга.

В другом аспекте настоящее изобретение предлагает установку доменной печи, включающую в себя доменную печь, снабженную шахтой, фурмами, расположенными для подачи потока водородсодержащего газа в доменную печь, и газовыми вводами в шахту доменной печи, расположенными для подачи потока сингаза в доменную печь, предпочтительно потока горячего сингаза. Установка доменной печи также включает в себя:

установку риформинга, включающую в себя по меньшей мере один риформер, находящийся в гидродинамическом соединении с колошником доменной печи и с источником углеводородсодержащего газа, причем эта установка риформинга предназначена для преобразования потока доменного газа и углеводородсодержащего газа в поток сингаза и находится в гидродинамическом соединении ниже по потоку с газовыми вводами в шахте доменной печи, и

источник потока  $H_2$ , находящийся в гидродинамическом соединении по меньшей мере с одним риформером и/или с газовыми вводами в шахту доменной печи и/или фурмой доменной печи.

В некоторых вариантах осуществления изобретения установка риформинга может также находиться в гидродинамическом соединении ниже по потоку с фурмой доменной печи.

Преимущественно, установка доменной печи выполнена для эксплуатации посредством осуществления способа согласно первому аспекту, который более подробно описан ниже.

Таким образом, в раскрытом документе предлагается интегрированный способ и соответствующая установка, позволяющие эксплуатировать доменную печь с уменьшенным количеством кокса и других источников углерода, с меньшим следом  $CO_2$  и с повышенной эффективностью утилизации водорода ( $H_2$ ).

Действительно, авторы настоящего изобретения обнаружили, что, сочетая утилизацию водорода ( $H_2$ ), рециркуляцию доменного газа и риформинг углеводородов, можно снизить выбросы  $CO_2$  установки доменной печи без негативного влияния на качество получаемого металла, например чугуна. Таким образом, одним из основных преимуществ настоящего способа и установки является то, что за счет регенерации части доменного газа для повторного

использования можно существенно снизить общее производство  $\text{CO}_2$  при работе доменной печи.

Еще одно важное преимущество заключается в том, что за счет повторного использования части доменного газа можно повысить общую  
5 энергоэффективность установки доменной печи, включающей в себя доменную печь, установку риформинга и кауперную установку, тем самым улучшив эффективность использования водорода. Добавленный  $\text{H}_2$  обычно не полностью  
расходуется внутри установки доменной печи, так что, по меньшей мере, часть добавленного  $\text{H}_2$  выходит из установки доменной печи в составе отводимого  
10 доменного газа. Отводимый доменный газ означает в данном контексте доменный газ, который остается от доменного газа, выходящего из доменной печи после его потребления в установке доменной печи, более конкретно после его потребления в доменной печи, в кауперной установке, и в установке риформинга.

15 Использование доменного газа в установке риформинга в качестве топливного газа для горелок по меньшей мере одного риформера также повышает степень использования доменного газа в установке доменной печи. Доменный газ, собираемый и перерабатываемый в установке доменной печи для получения сингаза, будет использоваться с очень высокой общей энергетической  
20 эффективностью. Благодаря риформингу он может прямо или косвенно использоваться для металлургических целей в доменной печи, а не направляться, например, на тепловую электростанцию. Как следствие, по меньшей мере, часть выходящей  $\text{H}_2$  не будет сжигаться для производства энергии с низким коэффициентом полезного действия, например электричества. Другими словами,  
25 при сжигании  $\text{H}_2$  теряется меньше энергии, и общая энергоэффективность использования  $\text{H}_2$  повышается.

Действительно, производство водорода часто требует большого количества энергии и происходит с эффективностью производства около 60%. При закачке  
30 водорода в доменную печь только часть водорода используется для восстановления железной руды внутри доменной печи. Как правило, от 30 до 55% добавленного водорода используется для восстановления железной руды, а остальная часть покидает доменную печь в составе колошниково-го газа. Сжигание водорода, содержащегося в колошниковом газе доменной печи, приводит к выработке электроэнергии с эффективностью около 30%. Это

приводит к "уничтожению" от 59 до 69% электроэнергии, использованной для производства этой части водорода.

Сбор водорода в колошнике доменной печи и повторное его использование в установке доменной печи с помощью высокоэффективной, обычно выше 80%, технологии риформинга снижает долю водорода, используемого на электростанции, и, следовательно, долю разрушения энергии.

Кроме того, впрыск полученного сингаза на уровне шахты доменной печи позволяет значительно снизить коэффициент коксования, то есть количество кокса и/или другого источника углерода на тонну произведенного чугуна.

Кроме того, впрыскивание сингаза в шахту доменной печи позволяет увеличить впрыскивание в фурму пылевидного угля, природного газа, прежде всего водорода, или других материалов. Таким образом, дополнительные объемы кокса могут быть заменены богатым водородом вспомогательным топливом, что позволяет еще больше снизить содержание углерода в доменном восстановителе и, следовательно, выбросы  $\text{CO}_2$ .

Тем не менее, более высокие скорости впрыска вспомогательных веществ приводят к еще более низкому использованию водорода, что требует еще большей рециркуляции доменного газа. Эта проблема может быть решена с помощью настоящих способов, как также показано в предпочтительном варианте осуществления изобретения.

Температура впрыска сингаза через шахту должна составлять около  $950^\circ\text{C}$ , но не превышать  $1050^\circ\text{C}$ , чтобы не расплавить материал внутри печи,

В вариантах осуществления изобретения, когда подаваемый через вал поток сингаза производится на установке риформинга, включающей в себя по меньшей мере один риформер с высоким уровнем температуры (то есть, обычно выше уровня температуры для впрыска в вал),  $\text{H}_2$  может быть выгодным образом добавлен в поток горячего сингаза ниже по потоку по меньшей мере от одного риформера. Таким образом, поток  $\text{H}_2$  действует как охладитель потока сингаза.

Использование водорода таким образом, то есть в качестве охладителя, полностью исключает необходимость нагрева водорода перед его впрыском через шахту доменной печи в дорогостоящем нагревательном устройстве. Действительно, избыточное тепло сингаза выгодно использовать для нагрева водорода. Это позволяет повысить эффективность процесса за счет устранения необходимости как в охлаждении сингаза, так и в нагреве водорода.

Кроме того, использование водорода в такой конфигурации позволяет обеспечить более высокие рабочие скорости впрыска водорода в доменную печь, поскольку водород нагревается в риформере и впрыскивается как часть сингаза на уровне шахты. Другими словами, для впрыска сингаза и водорода требуется  
5 одна система впрыска горячего газа, и нет необходимости в отдельной системе для нагрева водорода до температуры впрыска на уровне шахты.

Однако, если в других отраслях промышленности уровень давления в риформерах относительно высок, в основном выше 20 или даже выше 40 баррелей, то в доменной печи требуемый уровень давления составляет всего 1,5-  
10 6 баррелей. Это оказывает существенное влияние на условия эксплуатации и пределы работы оборудования для риформинга, такие как образование углерода и равновесное преобразование. В то время как более низкий уровень давления способствует более высокой конверсии метана при том же уровне температуры, он, к сожалению, также способствует образованию углеродной сажи. Именно по  
15 этой причине добавление потока  $H_2$  в поток доменного газа и/или углеводородсодержащего газа выше по потоку от риформера является особо выгодным, поскольку оно частично подавляет образование сажи, даже если одновременно снижает конверсию метана при заданной температуре по сравнению с отсутствием добавления водорода.

Водород также может быть добавлен как в углеводородсодержащий газ и/или поток доменного газа выше по потоку от риформера, так и в поток сингаза, впрыскиваемого на уровне шахты. Добавление водорода должно быть  
20 уравновешено между его использованием в качестве охладителя потока сингаза, подаваемого через шахту, и его добавлением в углеводородсодержащий газ и/или поток доменного газа выше по потоку от риформера для производства сингаза. Как уже упоминалось, добавление водорода в углеводородсодержащий газ и/или поток доменного газа помогает уменьшить образование сажи во время  
25 реакции риформинга.

Еще одним преимуществом настоящих изобретательских способов эксплуатации доменной печи является то, что водород впрыскивается либо в  
30 виде холодного водорода (то есть, не нагретого потока, нагретого только до температуры, представляющей экономический интерес), либо в виде чистой горячей  $H_2$  (то есть, без содержания  $CO_2$  и/или  $H_2O$ ), что предотвращает расслоение стали.

Основные преимущества и выгоды способа эксплуатации и установки доменной печи в соответствии с раскрытием изобретения могут быть обобщены следующим образом:

- 5 уменьшенное образование сажи в процессе риформинга,  
пониженная скорость коксования,  
повышенный уровень впрыска вспомогательного топлива в фурму и,  
прежде всего повышенный уровень впрыска водородосодержащего топлива,  
такого как углеводород и/или чистый водород  
10 высокая экономия  $\text{CO}_2$  за счет замены ископаемого топлива на водород  
улучшение работы доменной печи благодаря низкой вязкости  $\text{H}_2$ , что  
предотвращает такие проблемы, как проскальзывание в шахте, и улучшает  
гидродинамическую ситуацию в когезионной зоне с противотоком жидкая фаза  
(расплавленный чугун и шлак падают вниз)/газовая фаза (газ течет вверх) в  
коксовом слое  
15 улучшенное использование водорода в установке доменной печи за счет  
рециркуляции колошникового газа доменной печи, что приводит к повышению  
энергоэффективности использования водорода.

Эти и другие преимущества настоящего способа эксплуатации доменной  
печи, а также раскрытой в настоящем документе установки доменной печи будут  
20 более подробно описаны ниже.

В вариантах осуществления изобретения раскрытый способ эксплуатации  
доменной печи также включает в себя в себя подшаги, состоящие из:

- a1) факультативно, гидрирование и/или десульфуризация  
углеводородсодержащего газа и/или доменного газа,  
25 v1) подача другой части доменного газа, самостоятельно или в смеси с  
другими газами, в горелки риформера.

В таких вариантах осуществления изобретения очистка газа, условия  
риформинга и требования к температуре сингаза могут быть выгодным образом  
адаптированы в зависимости от положения добавления водорода.

- 30 Преимущественно,  $\text{H}_2$  может быть добавлен в поток доменного газа и/или в  
углеводородсодержащий газ перед установкой гидрирования (гидрогенизации)  
(перед шагом a1), выше по потоку о риформера (перед шагом б) и/или ниже по  
потоку от установки риформинга (после шага в) в случае, если температура  
сингаза слишком высока для его прямого впрыска в доменную печь.

По желанию, поток пара также может быть добавлен к углеводородсодержащему газу перед шагом а1), шагом в) и/или к потоку доменного газа перед шагом в) или к смеси доменного газа и углеводородсодержащего газа перед шагом в).

5 Поток  $H_2$  и/или поток углеводородсодержащего газа и/или поток доменного газа может быть нагрет, прежде всего любой из этих потоков или все они могут быть нагреты перед процессом риформинга, предпочтительно в теплообменнике, причем теплообменник предпочтительно рекуперировывает часть энергии дымового газа, выходящего из риформинга. Предпочтительно, поток

10 углеводородсодержащего газа и/или поток доменного газа предварительно нагревают (то есть, нагревают до умеренной температуры) выше по потоку от риформера. В вариантах осуществления изобретения, в которых поток  $H_2$  добавляется к потоку углеводородсодержащего газа и/или потоку доменного газа, поток  $H_2$  может быть предварительно нагрет в специальном нагревательном

15 устройстве перед его добавлением к потоку углеводородсодержащего газа и/или потоку доменного газа. Альтернативно, поток  $H_2$  может быть предварительно нагрет одновременно с потоком углеводородсодержащего газа и/или потоком доменного газа после добавления. Однако в вариантах осуществления изобретения, в которых поток  $H_2$  добавляют к потоку сингаза ниже по потоку от

20 риформера, поток  $H_2$  предпочтительно не нагревают или нагревают только до уровней температуры, которые являются экономически интересными, то есть, например, до уровней температуры, не требующих дорогостоящих мер предосторожности против высокотемпературного воздействия водорода, как правило, ниже  $600^\circ C$  или даже ниже  $400^\circ C$ . В контексте настоящего раскрытия

25 ненагретый поток водорода или поток водорода, нагретый только до экономически интересных температурных уровней, называется холодным.

В вариантах осуществления изобретения может потребоваться десульфуризация углеводородсодержащего газа в зависимости от его состава. Удаление серы, например, в слое оксида цинка требует, чтобы сера

30 присутствовала в неорганической форме, более конкретно в форме  $H_2S$ . Однако углеводородсодержащий газ очень часто содержит также органическую серу, которая должна быть преобразована в неорганическую серу,  $H_2S$ , в присутствии водорода и специального катализатора. Поэтому в вариантах осуществления изобретения может быть выгодным добавлять водород в углеводородный газ

также перед шагом гидрирования (шаг a1), если потребуется десульфуризация. Последнее не обязательно относится к доменному газу, поскольку сам по себе он может содержать достаточно водорода для процесса гидрирования.

5 Преимущественно топливный газ, включающий в себя часть доменного газа, а также воздух для использования в горелках по меньшей мере одного риформера установки риформинга, также нагревается в теплообменнике с использованием части энергии дымового газа процесса риформинга.

10 В предпочтительных вариантах осуществления изобретения поток  $H_2$  производят путем электролиза в электролизной ячейке. Предпочтительно, водород является возобновляемым или "зеленым". В контексте настоящего раскрытия возобновляемый или "зеленый" водород означает, что он предпочтительно производится электролизом воды и/или пара и/или что электроэнергия для работы электролизной ячейки производится из возобновляемого источника, такого как ветер, солнце и/или гидроэнергия.

15 Выражение "углеводород" или "углеводородсодержащий газ" в контексте настоящего раскрытия означает любой углеводород, находящийся в газообразном состоянии при температуре окружающей среды. Такой углеводородный газ, таким образом, включает в себя природный газ, то есть встречающуюся в природе углеводородную газовую смесь ископаемого происхождения, состоящую в основном из метана и обычно включающую различные количества других высших алканов, а также газы с аналогичными углеводородными компонентами, такие как биогаз, коксовый газ и т.д. Коксовый газ представляет собой смесь нескольких газов, в основном водорода (то есть, с содержанием водорода не менее 50%), метана (обычно составляющего 25% коксового газа), а остальное - смесь различных газов, таких как азот, CO, CO<sub>2</sub> или H<sub>2</sub>O. Таким образом, коксовый газ сам по себе уже содержит большое количество водорода.

20

25

Предпочтительно, углеводородсодержащий газ включает в себя природный газ, коксовый газ и/или биогаз.

30 Риформер может быть любого типа, например каталитическим риформером, реактором регенераторного типа, называемым также регенеративным риформером, риформером с плазменными горелками, риформером частичного окисления, риформером с кислородными/углеродными и/или углеводородными горелками.

Предпочтительно, поток сингаза образуется в результате сухого или мокрого риформинга. В так называемом процессе сухого риформинга углеводороды углеводородсодержащего газа, такие как метан, реагируют с  $\text{CO}_2$  в доменном газе с образованием  $\text{H}_2$  и  $\text{CO}$ . Таким образом, реакция сухого риформинга выглядит так:  $\text{CH}_4 + \text{CO}_2 = 2\text{CO} + 2\text{H}_2$ . В так называемом мокром риформинге углеводороды реагируют с  $\text{H}_2\text{O}$  в доменном газе с образованием  $\text{H}_2$  и  $\text{CO}$ . Таким образом, реакция мокрого риформинга протекает по схеме  $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + 3\text{H}_2$ . В любом случае получается сингаз, в котором значительно повышена концентрация  $\text{H}_2$  и  $\text{CO}$ .

Процесс риформинга может осуществляться как каталитически, так и некаталитически. Прежде всего, процесс риформинга природного газа может осуществляться как каталитическим, так и некаталитическим способом, в то время как риформинг коксового газа предпочтительно осуществляется некаталитическим способом. Каталитический процесс осуществляется в присутствии катализатора, а некаталитический процесс осуществляется без катализатора, то есть в отсутствие катализатора. Кроме того, процесс риформинга может осуществляться в одном риформере или в нескольких риформерах, например, в предварительном риформере и вторичном или основном риформере.

Для эффективного использования в доменной печи полученный сингаз должен быть высокого качества. Это качество обычно описывается его восстановительным потенциалом, который определяется как следующее молярное соотношение:  $(c\text{CO}+c\text{H}_2)/(c\text{HO}+c\text{CO}_2)$ . Для обеспечения достаточного качества сингаза восстановительный потенциал должен быть как можно выше, предпочтительно выше шести, более предпочтительно выше семи, а наиболее предпочтительно выше семи с половиной.

Термодинамически определенная степень восстановительного потенциала сингаза может быть достигнута только путем применения минимального уровня температуры в процессе риформинга. Процесс риформинга предпочтительно проводят при достаточно высокой температуре, чтобы поток сингаза имел как желаемый восстановительный потенциал, так и температуру, позволяющую подавать его через шахту доменной печи. В вариантах осуществления изобретения, в которых поток  $\text{H}_2$  добавляют к углеводородсодержащему газу и/или к потоку доменного газа выше по потоку от риформера, добавление

водорода помогает уменьшить образование сажи в риформинге и в трубопроводах, ведущих от риформинга к доменной печи для подачи сингаза через шахту доменной печи.

5 Кроме того, поток доменного газа перед подачей в риформер может быть подвергнут охлаждению газа и/или очистке и/или нагнетанию давления, предпочтительно удалению паров, пыли, металлов, HCl и/или сернистых компонентов.

10 В вариантах осуществления второй поток доменного газа может использоваться самостоятельно или в смеси с другими газами в горелках установки риформинга. В предпочтительных вариантах осуществления изобретения как можно больше выходящего из доменной печи доменного газа собирается для его использования в кауперной установке и установке риформинга. Другими словами, количество отводимого доменного газа в другие установки на сталелитейном заводе, как должно быть минимальным.

15 Предпочтительно, оно настолько мало, что позволяет избежать его утилизации на тепловой электростанции.

Выражение "в гидродинамическом соединении" означает, что два устройства соединены проводниками или трубами таким образом, что текучая среда, например газ, может перетекать из одного устройства в другое. Это

20 выражение включает в себя средства для изменения этого потока, например клапаны или вентиляторы для регулирования массового расхода, компрессоры для регулирования давления и т.д., а также элементы управления, такие как датчики, исполнительные механизмы и т.д., необходимые или желательные для соответствующего управления работой доменной печи в целом или работой

25 каждого из элементов внутри установки доменной печи.

В настоящем тексте термин "риформер" означает любую емкость, в которой может осуществляться процесс риформинга, например реактор риформинга или котел риформинга.

30 "Подача в шахту", "впрыскивание в шахту", "подача... в шахту доменной печи", "подача... на уровне шахты", "подача... через шахту", "подается на уровне шахты", "впрыскивается на уровне шахты" или "впрыскивание газа в шахту" подразумевает впрыскивание материала (например, газа) выше уровня горячего дутья, то есть выше заплечиков, предпочтительно в зоне газотвердого восстановления оксида железа выше зоны когезии в доменной печи.

"Подача... на уровне фурмы", "Подача... через фурму", "подача на уровне фурмы" или "впрыск на уровне фурмы" подразумевает впрыск материала (такого как, например, газ) через фурму доменной печи.

5 В настоящем тексте слова "подача в доменную печь" и "впрыск в доменную печь", а также "подача в доменную печь" и "впрыск в доменную печь" или "впрыск в доменную печь" используются соответственно как синонимы и имеют одинаковое значение, которое подразумевает впрыск материала в доменную печь.

10 "Или" в данном контексте не является исключительным и означает либо "или", либо "и".

"Примерно" в данном контексте означает, что данное числовое значение охватывает диапазон значений от -10 % до +10 % от указанного числового значения, предпочтительно диапазон значений от -5 % до +5 % от указанного числового значения.

15 В настоящем тексте шаг (в) относится к риформингу в целом. Он охватывает получение сингаза для впрыска через шахту или фурму, а также получение сингаза для одновременного впрыска через шахту и фурму.

20 Дополнительные подробности и преимущества настоящего раскрытия станут очевидны из следующего подробного описания нескольких неограничивающих вариантов осуществления со ссылкой на прилагаемые чертежи.

Краткое описание чертежей

25 Предпочтительные варианты осуществления раскрытия изобретения будут описаны далее, в качестве примера, со ссылкой на сопроводительные чертежи, на которых:

Фиг. 1 представляет собой схематический вид первого варианта установки доменной печи, выполненной для осуществления настоящего способа эксплуатации доменной печи,

30 Фиг. 2 представляет собой схематический вид второго варианта установки доменной печи, выполненной для осуществления настоящего способа эксплуатации доменной печи,

Фиг. 3 представляет собой схематический вид варианта осуществления третьего варианта установки доменной печи, выполненной для осуществления настоящего способа эксплуатации доменной печи, и

Фиг. 4 представляет собой график изменения концентрации  $C_2H_4$  в риформере в зависимости от температуры при различном содержании водорода.

Описание предпочтительных вариантов осуществления изобретения  
Выбросы  $CO_2$ :

5 Кокс является основным источником энергии при производстве доменного чугуна. С точки зрения выбросов  $CO_2$ , а зачастую и с экономической точки зрения, это менее выгодный источник энергии. Широко применяется замена  
10 кокса другими источниками энергии, в основном впрыскиваемыми на уровне фурмы. По соображениям стоимости в основном вводится пылевидный уголь, однако в странах с низкими ценами на природный газ используется и этот вид энергии. Часто в доменную печь также вводятся мусор, например отходы  
15 пластмасс. Стремясь к сокращению выбросов парниковых газов, промышленные предприятия начинают включать водород в состав вспомогательных видов топлива, и ожидается, что с повышением доступности водорода доля водорода в качестве вспомогательного топлива значительно возрастет.

Эти виды вспомогательного топлива могут оказать положительное влияние на выбросы  $CO_2$  при доменном производстве стали, однако их использование ограничено технологическими причинами, и очень часто эти пределы уже  
20 достигнуты сегодня. Доменная печь производит доменный газ (ДПГ), который содержит до 40 % энергии, подводимой в доменную печь. Около 25 % выходящего из доменной печи доменного газа обычно используется в кауперной установке для подогрева дутья, которое впрыскивается в фурмы доменной печи. Остальные 75 % доменного газа, содержащего около 30 % подводимой в  
25 доменную печь энергии, обычно используются для внутренних нужд в тепловой энергии сталелитейного завода, а также для производства электроэнергии.

Для сокращения выбросов  $CO_2$  при производстве стали в доменной печи одной из важных стратегий является использование как можно большей части доменного газа (ДПГ) для металлургических целей и применение других видов энергии, не содержащих  $CO_2$ , таких как "зеленая" электроэнергия, для  
30 удовлетворения оставшихся потребностей сталелитейного завода в энергии.

Таким образом, для производства синтез-газа, помимо использования обедненного углеводорода  $CO_2$ , следует по возможности использовать доменный газ, чтобы повысить потенциал сокращения выбросов  $CO_2$  при выплавке чугуна

в доменной печи, а также, при наличии в установке доменной печи, конвертерный газ и/или газ холодной основной кислородной печи (BOF).

Утилизация водорода для производства железа:

5 Утилизация водорода для производства чугуна может быть разделена на непосредственное использование водорода в установке доменной печи, а также на его использование во вспомогательных установках, прежде всего в кауперной установке и, если установлена, в установке риформинга для производства сингаза, который впрыскивается в шахту доменной печи.

10 Утилизация водорода в доменной печи обычно называется  $\eta_{H_2}$ .  $\eta_{H_2}$  определяется следующим образом:  $\eta_{H_2} = ((H_2 \text{ в доменной печи}) - (H_2 \text{ из доменной печи в колошниковом газе})) / (H_2 \text{ в ДП})$ . В данном тексте ДП означает доменную печь, так что  $(H_2 \text{ в ДП})$  относится к потоку  $H_2$ , подводимому в доменную печь, а  $(H_2 \text{ из ДП в колошниковом газе})$  относится к потоку  $H_2$  в колошниковом газе доменной печи, выходящему из колошника доменной печи.

15 "  $H_2$  в доменной печи" определяется как общее содержание водорода в газе в заплечиках (то есть, газе в когезионной зоне доменной печи) и в шахтном газе, вводимом в доменную печь на уровне шахты. Этот подводимый в доменную печь водород включает в себя, прежде всего, водород, содержащийся в сингазе, в инжестируемом молекулярном водороде  $H_2$ , в других водородсодержащих газах, в инжестируемом угле и/или смоле, во влажности инжестируемых газов и  
20 твердого топлива и во влажности горячего дутья.

" $H_2$  из ДП в колошниковом газе" определяется как расход сухого газа, выходящего из доменной печи, умноженный на концентрацию водорода в этом колошниковом газе.

25 Обычно значение  $\eta_{H_2}$  ниже 50%, а зачастую ниже 45%. Показатель  $\eta_{H_2}$ , а значит, и процент использования водорода в доменной печи, имеет еще и ту особенность, что он уменьшается с увеличением количества водорода, вводимого в доменную печь. Это означает, что при желании использовать больше водорода в доменной печи эффективность его использования сильно  
30 снижается, и гораздо большая часть водорода, введенного в доменную печь, уходит из нее с колошниковым газом. Вследствие этого уменьшается и достижимое снижение скорости коксования на килограмм введенного водорода, что косвенно снижает потенциал сокращения выбросов  $CO_2$  введенного водорода.

Кроме того, при увеличении впрыска вспомогательного топлива (то есть, водородсодержащего газа) необходимо увеличить обогащение кислородом для поддержания температуры пламени. Увеличение обогащения кислородом в доменной печи означает уменьшение количества природного дутья (воздуха), которое будет использоваться в доменной печи. Вследствие этого общее количество поступающего в доменную печь горячего дутья уменьшается. Это означает, что для нагрева горячего дутья может быть использовано меньше доменного газа.

Это означает, что при увеличении процентного содержания водорода в доменной печи для восстановления железной руды меньшая часть этого водорода используется в доменной печи, и меньшая часть от этого - в кауперной установке, что приводит к увеличению количества водорода, покидающего установку доменной печи в составе отводимого газа.

Это показано в следующей таблице (Таблица 1), в которой сравниваются эталонная работа доменной печи и работа доменной печи с впрыском водорода в соответствии с тремя вариантами осуществления настоящего способа согласно изобретению.

Таблица 1

Поз.		Един.	Эталон	Пример 1: Впрыск H <sub>2</sub>	Пример 2: Впрыск H <sub>2</sub> + шахтный сингаз	Пример 3: Макс. впрыск H <sub>2</sub> + шахтный сингаз
1	Производство горячих металлов (ГМ)	т ГМ/ час	300	300	300	300
2	Количество кокса	т/час	90,3	87,12	67,35	63,03
3	Впрыскивание пылевидного угля	т/час	57,6	57,6	57,6	57,6
4	Природный газ, используемый для производства сингаза	Нм <sup>3</sup> /т	0	0	9993	9993
5	Впрыск H <sub>2</sub> в фурме	Нм <sup>3</sup> /т ГМ		38	38	109
6	Впрыск сингаза в шахте доменной печи	Нм <sup>3</sup> /т			120000	120000
7	H <sub>2</sub> , содержащийся во впрыскиваемом в шахту сингазе	Нм <sup>3</sup> /т			61963	64485
8	H <sub>2</sub> в газе в заплечиках	Нм <sup>3</sup> /т	30322	41520	41062	60821
9	H <sub>2</sub> всего	Нм <sup>3</sup> /т	30322	41520	103025	125306
10	H <sub>2</sub> (из ДП в колошниковом газе)	Нм <sup>3</sup> /т	15901	21860	62053	76261
11	Eta H <sub>2</sub> (утилизация H <sub>2</sub> в доменной печи)		47,6%	47,4%	39,8%	39,1%
12	Энергия колошникового газа	ГДж/ч	1469531	1475909	1978421	2057046
13	Потребность в тепловой энергии сталелитейного	ГДж/ч	541180	494746	392866	313884

Поз.		Един.	Эталон	Пример 1: Впрыск H <sub>2</sub>	Пример 2: Впрыск H <sub>2</sub> + шахтный сингаз	Пример 3: Макс. впрыск H <sub>2</sub> + шахтный сингаз
	завода					
14	Потребность в колошниковом газе реактора сингаза	ГДж/ч			575753	654788
15	Отвод колошникового газа	ГДж/ч	928351	981163	1009801	1088374
16	Отвод H <sub>2</sub>	Нм <sup>3</sup> /т	10045	14532	31672	40349
17	Соотношение отвода H <sub>2</sub>		33%	35%	31%	32%
18	Утилизация H <sub>2</sub> в установке доменной печи		67%	65%	69%	68%
19	CO <sub>2</sub> выбросы от кокса, пылевидного угля и природного газа	т/час	0	0	0	0

При эталонной работе в доменной печи используется только впрыскивание кокса и пылевидного угля в фурму, в то время как в примере 1 на уровне фурмы доменной печи дополнительно впрыскивается холодный водород.

5 В примере 1 видно, что коэффициент отвода водорода из установки доменной печи увеличивается на 4,487 Нм<sup>3</sup> с 10,045 Нм<sup>3</sup>/ч (для эталонного случая) до 14,532 Нм<sup>3</sup>/ч (для примера 1) при увеличении ввода водорода в доменную печь на 11,198 Нм<sup>3</sup> с 30,322 (для эталонного случая) до 41,520 Нм<sup>3</sup>/ч (для примера 1). Это приводит к снижению утилизации водорода в установке доменной печи с 67 до 65%. Другими словами, 4,487 Нм<sup>3</sup>, которые покидают установку доменной печи в колошниковом газе, составляют 40 % от  
10 дополнительно закачанного водорода в объеме 11,198 Нм<sup>3</sup>, поэтому использование дополнительного водорода в доменной печи значительно ниже и составляет всего 60 %.

15 В примере 2 (табл. 1) горячий сингаз впрыскивается в шахту доменной печи при температуре 950°С. Теперь видно, что даже если общее количество водорода, впрыскиваемого в доменную печь, увеличивается более чем в три раза по сравнению с эталонным случаем, его использование в установке доменной печи возрастает с 67 до 69 %. Это очень впечатляет, поскольку показывает, что  
20 лишь небольшое добавление водорода в доменную печь на уровне фурмы уже влияет на снижение утилизации водорода в установке доменной печи. По сравнению с эталонным случаем, когда дополнительно вводится 72,703 Нм<sup>3</sup> водорода, только 21,627 Нм<sup>3</sup> или 30% покидает установку доменной печи вместе с отводимым газом.

В последнем случае, показанном в таб. 1 (пример 3), количество входящего в доменную печь водорода было значительно увеличено, то есть более чем в четыре раза по сравнению с эталонным случаем. Уже сейчас видно, что утилизация водорода в установке доменной печи выше, чем в эталонном случае.

5 Из дополнительных 94,984 Нм<sup>3</sup> водорода только 30,304 Нм<sup>3</sup> или 32% покидают установку доменной печи вместе с отводимым газом.

#### Энергоэффективность

10 Для достижения общей высокой эффективности процесса кауперная установка, а также установка риформинга предпочтительно оснащаются системами рекуперации тепла для предварительного нагрева воздуха для горения и/или газа для горения. КПД обеих установок должен быть выше 70%, прежде всего выше 80%.

Требования к риформингу и сингазу:

15 Требования к сингазу для его использования в доменной печи отличаются от требований для применения в других отраслях промышленности.

Основные требования к утилизации сингаза в доменной печи следующие:

Потенциал редукции и уровень температуры сингаза:

20 В других отраслях промышленности сингаз обычно производится, а затем охлаждается для отделения избытка пара от сингаза. Таким образом, в процессах ниже по потоку используется только охлажденный газ. Поэтому в существующих промышленных областях, помимо сталелитейной промышленности, высокий потенциал редукции, достигаемый непосредственно в процессе риформинга, не имеет большого значения. Однако в сталелитейной промышленности высокий восстановительный потенциал, предпочтительно  
25 наиболее высокий и по меньшей мере выше 6, является предпочтительным и очень выгодным для высокой эффективности процесса, причем восстановительный потенциал, или степень восстановления, определяется как:  $(cCO+cH_2)/(cHO+cCO_2)$ , причем  $c$  означает молярную концентрацию, например,  $cCO$  означает молярную концентрацию CO в сингазе,  $cH_2$  означает молярную  
30 концентрацию H<sub>2</sub> в сингазе,  $cH_2O$  означает молярную концентрацию H<sub>2</sub>O в сингазе, а  $cCO_2$  означает молярную концентрацию CO<sub>2</sub> в сингазе.

Кроме того, высокая температура сингаза предпочтительна и совместима с уровнем температуры, необходимым для впрыска в шахту через фурму и/или через шахту, чтобы обеспечить максимальную термическую эффективность.

Таким образом, температура должна составлять от 850 до 1100°C, предпочтительно около 950°C, чтобы обеспечить впрыск в шахту над когезионной зоной доменной печи, то есть на уровне шахты.

Соотношение  $H_2/CO$ :

5 В других отраслях промышленности, помимо сталелитейной, сингаз используется для специфических приложений, таких как производство чистого водорода, аммиака или других химических компонентов. Поэтому обычно требуется определенное соотношение водорода и CO в сингазе.

10 Для сравнения, объектом использования сингаза в доменной печи является восстановление руды, которое достигается с помощью обоих восстановительных компонентов, CO и водорода. Хотя существует разница между восстановлением руды с помощью CO или водорода, эта разница относительно незначительна, учитывая, что сингаз является лишь одной частью восстановительного газа, используемого в доменной печи.

15 Уровень давления:

В то время как в других отраслях промышленности уровни давления в риформерах относительно высоки, в основном выше 20 бар избыточного давления или даже выше 40 бар избыточного давления, в доменных печах требуемый уровень давления составляет всего 1,5-6 бар избыточного давления.  
20 Это оказывает существенное влияние на условия эксплуатации и пределы работы оборудования для риформинга, такие как образование сажи и равновесное преобразование. В то время как более низкий уровень давления способствует более высокой конверсии метана при том же уровне температуры, он, к сожалению, также способствует образованию сажи, поэтому добавление  
25 потока  $H_2$  в поток доменного газа и/или углеводородсодержащего газа выше по потоку от риформера является особо выгодным для частичного подавления образования сажи, даже если это одновременно снижает конверсию метана при заданной температуре по сравнению с отсутствием добавления водорода.

Добавление водорода:

30 Как уже было показано выше, водород может просто добавляться в фурму доменной печи в виде  $H_2$ , а также в виде углеводорода. Однако можно также использовать добавление водорода для положительного влияния на производство сингаза и его впрыск в шахту доменной печи.

Поток водорода, предпочтительно возобновляемого, добавляется в способ, прежде всего перед риформером, уменьшая образование сажи, или после риформера в поток сингаза, впрыскиваемого через шахту, чтобы одновременно охладить его и увеличить его восстановительный потенциал. В настоящем

5 тексте, когда речь идет о сингазе, восстановительный потенциал и степень восстановления используются как синонимы друг друга и оба обозначают молярное соотношение  $(cCO+cH_2)/(cH_2O+cCO_2)$ . Перед добавлением водорода выше по потоку от риформера может быть полезным нагрев потока водорода.

Реакции риформинга для получения сингаза:

10 Риформинг углеводородных газов, например, природного газа, может осуществляться в основном за счет следующих реакций:

Паровой риформинг в присутствии пара:  $CH_4 + H_2O = CO + 3H_2$

Сухой риформинг в присутствии  $CO_2$ :  $CH_4 + CO_2 = 2CO + 2H_2$

15 Эти две реакции сильно эндотермичны и требуют большого количества тепла.

Это тепло может быть получено косвенно, путем сжигания топливного газа и передачи тепла отходящих газов в реактор, или же путем сочетания реакции риформинга с реакцией частичного окисления в соответствии с приведенной ниже формулой:

20  $CH_4 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO + 2H_2$

Наряду с реакциями риформинга, в риформере могут протекать побочные реакции. Относительная значимость этих реакций зависит от условий эксплуатации, таких как состав газа, температура и давление, использование и природа катализаторов и т.п. Основными побочными реакциями при

25 температурах, близких к температуре риформинга, являются:

Реакция обратного водогазового сдвига (RWGS):  $CO_2 + H_2 \rightarrow CO + H_2O$

$CH_4$  разложение:  $CH_4 \rightarrow C + 2H_2$

Реакция метанирования  $4H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$  or  $3H_2 + CO \rightarrow CH_4 + H_2O$

30 А также множество реакций, которые являются частью реакционной схемы для производства сажи/углеродистых отложений. Примером таких реакций является образование ацетилена, как показано ниже:

Образование ацетилена:  $2CH_4 \rightarrow C_2H_2 + 3H_2$

Этот ацетилен может стать молекулой (прекурсором) при создании ароматических углеводородов, входящих в состав сажи, или может быть термически разложен по следующей реакции:



5 Водород участвует в большинстве этих реакций и, таким образом, оказывает важное влияние на саму реакцию риформинга, а также на побочные реакции. Поэтому можно воспользоваться преимуществами желаемой утилизации водорода в доменной печи для целей снижения содержания  $\text{CO}_2$  для дальнейшего улучшения процесса риформинга углеводородов, например, для  
10 снижения образования и отложения сажи, путем добавления  $\text{H}_2$  в поток доменного газа и/или углеводородсодержащего газа выше по потоку от риформера.

Подробное описание трех различных вариантов осуществления изобретения

15 Далее на прилагаемых чертежах показаны три различных варианта способа эксплуатации доменной печи и установки доменной печи.

На фиг. 1 показано осуществление первого варианта настоящего способа эксплуатации доменной печи, включающего одновременную подачу первого потока сингаза через шахту доменной печи и второго потока сингаза через  
20 фурму доменной печи.

20 Доменный газ 10, выходящий из доменной печи 12, собирается в колошнике доменной печи 12.

Собранный доменный газ 10 обычно подвергается предварительной обработке при выходе из доменной печи. Предварительная обработка потока доменного газа включает в себя сначала охлаждение для снижения содержания  
25 паров, очистку, прежде всего удаление пыли и/или  $\text{HCl}$  и/или соединений металлов, а затем нагнетание давления, достаточного для последующего обессеривания, нагрева, процесса риформинга и впрыска в доменную печь. В варианте осуществления изобретения, представленном на фиг. 1, охлаждение, очистка и нагнетание давления доменного газа происходит в блоке 14  
30 охлаждения, очистки и нагнетания давления. В качестве альтернативы, возможно использование отдельных блоков, каждый из которых выполняет либо одно из действий по охлаждению, очистке или нагнетанию доменного газа. В других вариантах осуществления изобретения один блок может отвечать за два шага - охлаждение, очистку и прессование доменного газа, а третий шаг

предварительной обработки выполняется в отдельном блоке. В настоящем тексте блок охлаждения, очистки и нагнетания давления представляет собой блок, выполненный для охлаждения, очистки и нагнетания давления в поток газа, не предполагая, что различные шаги (охлаждение, очистка и нагнетание) должны выполняться в таком порядке. В вариантах осуществления изобретения нагнетание давления может происходить перед очисткой, например, в вариантах осуществления изобретения, причем очистка потока газа представляет собой десульфуризацию.

Ниже по потоку от блока 14 охлаждения, очистки и нагнетания давления поток доменного газа разделяется на три потока. Первый поток доменного газа 16 подается на первую установку 18 риформинга, а второй поток доменного газа 20 подается на вторую установку 22 риформинга. В данном варианте осуществления изобретения обе установки риформинга являются установками регенеративного типа. Третий поток доменного газа 27 называется отводимым доменным газом и соответствует доменному газу, подаваемому в другой сталеплавильный цех, включающий в себя установку доменной печи и установки 18, 22 риформинга.

Кроме того, на установки 18, 22 риформинга подается поток 24 коксового газа и/или природного газа.

Основной кислородный печной газ и/или пар могут быть добавлены в поток доменного газа (выше и/или ниже по потоку от установки 14 охлаждения, очистки и нагнетания давления) и/или в поток углеводородсодержащего газа 24 и/или непосредственно в установку 18, 22 риформинга (не показана).

Риформинг первого потока доменного газа 16 вместе с потоком 24 коксового газа и/или природного газа осуществляется в первой установке 18 риформинга для получения первого потока сингаза 26. Риформинг второго потока доменного газа 20 вместе с потоком 24 коксового газа и/или углеводородсодержащего газа осуществляется на установке 22 риформинга с получением второго потока сингаза 28.

Оба процесса риформинга являются сухими и/или мокрыми процессами риформинга, возможно, в сочетании с частичным окислением, что приводит к образованию двух потоков сингаза 26, 28 с высоким содержанием CO и H<sub>2</sub>. Процессы риформинга происходят при давлении от 1,5 до 10 бар избыточного

давления и, в зависимости от установки риформинга, при температуре выше 900°C, предпочтительно выше 950°C, более предпочтительно выше 1000°C.

Доменный газ и/или углеводородсодержащий газ перед процессом риформинга можно дополнительно нагреть (не показано). Нагрев может  
5 осуществляться, например, с помощью трубчатых пучковых теплообменников. Второй поток сингаза 28, выходящий из второй установки 22 риформинга, подается в доменную печь через фурму 30 с температурой около 1200°C и давлением от 2 до 6 бар избыточного давления.

Кроме того, установка доменной печи включает в себя электролизную  
10 ячейку 32, питаемую электрической энергией 34, для получения потока H<sub>2</sub> 36 путем электролиза, предпочтительно электролиза воды/пара. Подаваемая в электролизную камеру 32 электроэнергия 34, предпочтительно, является возобновляемой или "зеленой", то есть полученной из возобновляемого источника, такого как ветер, солнце и/или гидроэнергия.

Альтернативно или дополнительно, водород может быть получен из  
15 природного газа в процессе пиролиза с образованием твердого углерода или с использованием комбинированной технологии улавливания и хранения углерода (CCS) и/или технологии улавливания и утилизации углерода (CCU). Водород также может быть получен путем термического крекинга метана или парового  
20 риформинга метана с комбинированной технологией CCS и/или CCU.

Полученный в электролизной ячейке поток H<sub>2</sub> 36, добавляется к первому потоку сингаза 26 ниже по потоку от первой установки 18 риформинга и выше по потоку от газовых вводов 38, расположенных через шахту внутри доменной  
25 печи 12. Дополненный водородом 36 первый поток сингаза 26 образует поток H<sub>2</sub>-обогащенного газа 40, который подается в доменную печь через газовые вводы 38 на уровне шахты, с температурой около 900°C и типичным давлением от 1,5 до 4 бар избыточного давления.

Поток H<sub>2</sub> 36 действует как охладитель первого потока сингаза 26. Использование водорода таким образом, то есть в качестве охладителя,  
30 полностью исключает необходимость нагрева водорода перед его впрыском через шахту доменной печи 12 в дорогостоящем нагревательном устройстве. Действительно, избыточное тепло сингаза 26 нагревает водород. Это позволяет повысить эффективность процесса за счет устранения необходимости как в охлаждении сингаза, так и в нагреве водорода.

На фиг. 2 показано осуществление второго варианта настоящего способа эксплуатации доменной печи, включающего одновременную подачу первого потока сингаза через шахту доменной печи и второго потока сингаза через фурму доменной печи.

5           Выходящий из доменной печи 112 доменный газ 110 собирается в колошнике доменной печи 112.

10           Собранный доменный газ 110 обычно подвергается предварительной обработке при выходе из доменной печи. Предварительная обработка потока доменного газа включает в себя сначала охлаждение для снижения содержания паров, очистку, прежде всего удаление пыли и/или HCl и/или соединений металлов и/или сернистых компонентов, а затем нагнетание давления для создания давления, достаточного для процесса риформинга и впрыска в доменную печь. В варианте осуществления на фиг. 2 охлаждение, очистка и нагнетание доменного газа происходит в блоке 114 охлаждения, очистки и нагнетания давления. В качестве альтернативы, возможно использование отдельных блоков, каждый из которых выполняет либо одно из действий по охлаждению, очистке или нагнетанию доменного газа. В других вариантах осуществления изобретения один блок может отвечать за два шага охлаждения, очистки и нагнетания давления доменного газа, а третий шаг предварительной обработки выполняется в отдельном блоке.

15

20

Ниже по потоку от блока 114 охлаждения, очистки и нагнетания давления поток доменного газа разделяется на три потока. Первый поток доменного газа 116 подается на первую установку риформинга 118, а второй поток доменного газа 120 подается на вторую установку риформинга 122. В настоящем варианте осуществления изобретения обе установки риформинга являются установками регенеративного типа. Третий поток доменного газа 127 называется отводимым доменным газом и соответствует доменному газу, подаваемому в другой сталеплавильный цех, включающей в себя установку доменной печи с установками 118, 122 риформинга.

25

30           Кроме того, установка доменной печи включает в себя, помимо доменной печи и блока 114 охлаждения, очистки и нагнетания давления, источник потока 124 коксового газа и/или природного газа, находящегося в гидродинамической связи сообщении с каждой из установок 118, 122 риформинга, и электролизную ячейку 132, питаемую электроэнергией 134 для получения потока H<sub>2</sub> 136 путем

электролиза, предпочтительно электролиза воды. Электроэнергия 134, подаваемая в электролизную камеру 132, предпочтительно является возобновляемой или "зеленой", то есть полученной из возобновляемого источника, такого как ветер, солнце и/или гидроэнергия.

5           Полученный в электролизной ячейке Поток  $H_2$  136 добавляется к потоку 124 коксового газа и/или природного газа перед установками 118, 122 риформинга с образованием потока  $H_2$ -обогащенного углеводородсодержащего газа 142, который подается на каждую из установок 118, 122 риформинга. Основной кислородный печной газ и/или пар могут быть добавлены в поток доменного газа (выше по потоку и/или ниже по потоку от установки 114  
10           охлаждения, очистки и нагнетания давления) и/или в поток углеводородсодержащего газа 124 и/или в поток  $H_2$  136 и/или непосредственно в установку 118, 122 риформинга (не показана).

          Риформинг первого потока доменного газа 116 вместе с потоком  $H_2$  -  
15           обогащенного углеводородсодержащего газа 142 осуществляется в первой установке риформинга 118 с получением первого потока сингаза 126. Риформинг второго потока доменного газа 120 вместе с потоком  $H_2$  -обогащенного углеводородсодержащего газа 142 осуществляется на второй установке риформинга 122 с получением второго потока сингаза 128.

20           Оба процесса риформинга являются сухим риформингом, что приводит к образованию двух потоков сингаза 126, 128 с высоким содержанием CO и  $H_2$ . Процессы риформинга происходят при давлении от 1,5 до 10 бар избыточного давления и в зависимости от установки риформинга при температуре выше  $900^\circ C$ , предпочтительно  $1000^\circ C$ , более предпочтительно выше  $1200^\circ C$ .

25           Доменный газ и/или водородсодержащий газ могут быть дополнительно нагреты перед процессом риформинга (не показано). Нагрев может осуществляться, например, с помощью теплообменников с трубным пучком.

          Добавление водорода в углеводородсодержащий газ перед установками 118, 122 риформинга и, таким образом, перед процессом риформинга поможет  
30           уменьшить образование сажи во время реакции риформинга. Образование углеродистых отложений в процессе сухого риформинга является известной проблемой. В установке риформинга происходят различные реакции, приводящие к образованию углеродистых отложений. Большое количество таких реакций включает в себя образование предшественников этена  $C_2H_4$  и ацетилена

$C_2H_2$ . Образование этих прекурсоров из метана приводит к выделению водорода и увеличению объема газа. Таким образом, можно уменьшить образование предшественников углеродных отложений и, следовательно, образование самих углеродных отложений путем увеличения парциального давления водорода во входном газе реактора, что означает добавление  $H_2$  в газовую смесь, подлежащую риформингу, например, путем добавления  $H_2$  в углеводородсодержащий газ и/или в поток сингаза. Например, как показано на фиг. 4, увеличение количества  $H_2$  в газовой смеси, подлежащей риформингу, с 10% до 40% приводит к значительному снижению концентрации  $C_2H_4$  в установке риформинга, с примерно 0,35% до примерно 0% при температуре 1225°C.

Выходящий из второй установки риформинга 118 первый поток сингаза 126 подается в доменную печь через газовые вводы 138, расположенные через шахту внутри доменной печи 112 (то есть, второй поток сингаза 126 подается через шахту доменной печи) с температурой около 950°C и давлением от 1,5 до 4 бар избыточного давления. В зависимости от процесса риформинга второй поток сингаза может быть охлажден перед подачей через шахту доменной печи до температуры около 950°C.

Выходящий из установки второго риформинга 122 второй поток сингаза 128 подается в доменную печь через фурму 130 с температурой около 1200°C и давлением от 2 до 6 бар избыточного давления.

На фиг. 3 показан третий вариант осуществления настоящего способа эксплуатации доменной печи, включающий одновременное впрыскивание первого потока сингаза через шахту доменной печи вместе с впрыскиванием холодного водорода и/или углеводородсодержащего газа и, возможно, пылевидного угля через фурму доменной печи.

Выходящий из доменной печи 212 доменный газ 210 собирается в колошнике доменной печи 212.

Собранный доменный газ 210 после выхода из доменной печи обычно подвергается предварительной обработке в устройстве 214 для очистки и охлаждения газа. Предварительная обработка потока доменного газа включает в себя сначала охлаждение для снижения содержания паров, очистку, прежде всего удаление пыли и/или  $HC1$  и/или соединений металлов.

Часть очищенного доменного газа 219 используется в качестве топлива вместе с влажным воздухом 223, а зачастую и с другими высококалорийными газами (не показаны) в горелках кауперной установки 221 для подогрева дутья, которое вводится в доменную печь на уровне фурмы. Как газы, так и воздух могут быть предварительно нагреты или нет.

Другая часть доменного газа 217 используется в качестве топлива вместе с влажным воздухом 223 и часто вместе с другими высококалорийными газами (не показаны) в горелках установки 218 риформинга. Как газы, так и воздух могут быть предварительно нагреты или нет.

Другой поток 216 доменного газа используется в реакции риформинга. Этот поток далее подается в компрессор (блок нагнетания давления) 215 для сжатия доменного газа до необходимого уровня давления для риформинга и впрыска в доменную печь.

Остаточный доменный газ, выходящий из доменной печи 212 и не используемый ни в установке риформинга, ни в кауперной установке, относится к отводимому газу доменной печи 227 и подается в другие агрегаты сталелитейного завода, включающего доменную печь 212.

В показанном на фиг. 3 варианте осуществления после компрессора (блока нагнетания давления) 215 дополнительно имеется блок 250 гидрирования и десульфуризации.

Дополнительно, поток 224 коксового газа и/или природного газа подается в установки 218 риформинга. Газ 224 может быть десульфурован в блоке 250 десульфуризации. Десульфуризация газа 224 может быть выполнена одновременно с десульфуризацией доменного газа (фиг.3). В качестве альтернативы, газ 224 может быть десульфурован в отдельном блоке десульфуризации (не показан). В таких вариантах осуществления изобретения природный газ может добавляться водород для гидрирования органической серы, содержащейся в природном газе (не показано).

Основной кислородный печной газ и/или пар 225 могут быть добавлены в поток доменного газа (выше по потоку и/или ниже по потоку от блока 215 нагнетания давления), в блок 250 гидрирования и десульфуризации, в поток углеводородсодержащего газа 224 (не показан) и/или непосредственно в установку 218 риформинга или после установки 224 риформинга.

Риформинг потока доменного газа 216 вместе с потоком 224 коксового газа и/или природного газа осуществляется в установке 218 риформинга для получения потока сингаза 226. Два газовых потока - доменный газ 216 и углеводородсодержащий газ - необходимо смешать перед входом в установку 218 риформинга, внутри установки 218 риформинга и/или перед входом в блок 250 гидрирования и десульфуризации.

Процессы риформинга представляют собой сухие и/или мокрые процессы риформинга, возможно, в сочетании с частичным окислением, что приводит к образованию потока сингаза 226 с высоким содержанием CO и H<sub>2</sub>. Процессы риформинга происходят при давлении от 1,5 до 10 бар избыточного давления и, в зависимости от установки риформинга, при температуре выше 900°C, предпочтительно выше 950°C, более предпочтительно выше 1000°C.

Перед процессом риформинга доменный газ и/или водородсодержащий газ могут быть дополнительно нагреты (не показано). Нагрев может осуществляться, например, с помощью трубчатых пучковых теплообменников, передающих часть тепла дымового газа из установки риформинга. То же самое относится и к газовой смеси, состоящей из доменного газа и углеводородсодержащего газа, поступающей на установку риформинга, которая, предпочтительно, также нагревается по меньшей мере до 350°C, более предпочтительно до температуры выше 400°C, а наиболее предпочтительно до температуры выше 450°C. По желанию, используемые в горелках кауперной установки и/или установки риформинга доменный газ и воздух могут также нагреваться, передавая часть тепла дымового газа из установки риформинга в теплообменниках, например в теплообменнике с трубным пучком.

Кроме того, установка доменной печи включает в себя питаемую электрической энергией 234 электролизную ячейку 232 для получения потока H<sub>2</sub> 236 путем электролиза, предпочтительно электролиза воды/пара. Подаваемая в электролизную камеру 232 электроэнергия 234, предпочтительно, является возобновляемой или "зеленой", то есть полученной из возобновляемого источника, такого как ветер, солнце и/или гидроэнергия.

Альтернативно или дополнительно, водород может быть получен из природного газа в процессе пиролиза с образованием твердого углерода или с использованием комбинированной технологии улавливания и хранения углерода (CCS) и/или технологии улавливания и утилизации углерода (CCU). Водород

также может быть получен путем термического крекинга метана или парового риформинга метана с комбинированной технологией CCS и/или CCU.

Полученный в электролизной ячейке поток  $H_2$  236 или его часть добавляют к потоку 224 коксового газа и/или природного газа перед установкой 218 риформинга для образования потока  $H_2$ -обогащенного углеводородсодержащего газа, который подается в установку 218 риформинга и/или часть его подается в поток углеводородсодержащего газа перед шагом гидрирования и/или подается холодным в фурму доменной печи самостоятельно или вместе с другими вспомогательными видами топлива, такими как уголь, природный газ, пластмассы, биомасса и тому подобное.

Основной кислородный печной газ и/или пар могут быть добавлены к потоку доменного газа (выше по потоку и/или ниже по потоку от блока 215 нагнетания давления или блока 250 гидрирования) (не показано) и/или к потоку углеводородсодержащего газа 224 (не показано) и/или к потоку  $H_2$  236 (не показано) и/или непосредственно в установку 218 риформинга или после установки 218 риформинга.

Часть потока  $H_2$  236 может быть добавлена к потоку сингаза 226 ниже по потоку от установки 218 риформинга и выше по потоку от газовых вводов 238, расположенных через шахту внутри доменной печи 212. Дополненный водородом 236 поток сингаза 226 образует поток  $H_2$ -обогащенного газа 240, который подается в доменную печь через газовые вводы 238 на уровне шахты, с температурой около  $900^\circ C$  и типичным давлением от 1,5 до 4 бар избыточного давления.

Часть водорода 236 и/или углеводородсодержащего газа 224 также может быть непосредственно введена через фурму 230 доменной печи. В вариантах осуществления изобретения впрыск водорода 236 и/или углеводородсодержащего газа 224 может осуществляться одновременно с впрыском твердого топлива, например впрыском пылевидного угля 229.

Часть потока  $H_2$  236 может быть использована в качестве охладителя первого потока сингаза 226. Использование водорода таким образом, то есть в качестве охладителя, полностью исключает необходимость нагрева водорода перед его впрыском через шахту доменной печи 212 в дорогостоящем нагревательном устройстве. Действительно, избыточное тепло сингаза 226

нагревает водород. Это позволяет повысить эффективность процесса за счет устранения необходимости как в охлаждении сингаза, так и в нагреве водорода.

5 Хотя изобретение было подробно проиллюстрировано и описано на чертежах и в предыдущем описании, такие иллюстрации и описание должны рассматриваться как иллюстративные или примерные, а не ограничивающие, изобретение не ограничено раскрытыми вариантами осуществления. Другие варианты раскрытых вариантов могут быть поняты и осуществлены специалистами в данной области при осуществлении заявленного изобретения на основании изучения чертежей, раскрытия и прилагаемой формулы

10 изобретения.

## СПИСОК ССЫЛОЧНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

	10, 110, 210	Поток доменного газа
	12, 112, 212	Доменная печь
5	14, 114, 214	Блок охлаждения, очистки и нагнетания давления
	16, 116, 216	Первый поток доменного газа
	18, 118, 218	Первая установка риформинга
	20, 120	Второй поток доменного газа
	22, 122	Вторая установка риформинга
10	24, 124, 224	Поток коксового газа и/или природного газа
	26, 126, 226	Первый поток сингаза
	27, 127, 227	Доменный отводимый газ
	28, 128	Второй поток сингаза
	30, 130, 230	Уровень фурмы доменной печи
15	32, 132, 232	Электролизная ячейка
	34, 134, 234	Электрическая энергия
	36, 136, 236	Поток $H_2$
	38, 138, 238	Газовые вводы через шахту доменной печи
	40, 240	$H_2$ -обогащенный поток сингаза
20	142	$H_2$ -обогащенный поток углеводородсодержащего газа
	215	Блок нагнетания давления (компрессор)
	217	Доменный газ, подаваемый в горелки установки риформинга
	219	Доменный газ, подаваемый в горелки кауперной установки
	221	Кауперная установка
25	223	Влажный воздух
	225	Пар
	229	Пылевидный уголь
	250	Блок гидрирования и десульфуризации

## ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ эксплуатации доменной печи (12, 112, 212), включающий в себя шаги:

5 а) сбор потока доменного газа (16, 116, 216) из доменной печи (12, 112, 212), имеющей шахту и по меньшей мере одну фурму,

б) подача потока доменного газа (16, 116, 216) и углеводородсодержащего газа (24, 124, 224) в установку риформинга, включающую в себя по меньшей мере один риформер (18, 118, 218),

10 в) риформинг потока доменного газа (16, 116, 216) и углеводородсодержащего газа (24, 124, 224) в установке (18, 118, 218) риформинга для получения потока сингаза (26, 126, 226), и

г) подача, по меньшей мере, части потока сингаза (26, 126, 226) в доменную печь (12, 112, 212),

15 причем к углеводородсодержащему газу (24) перед шагом (в) и/или к потоку доменного газа (16) перед шагом (в) и/или к смеси, состоящей из доменного газа и углеводородсодержащего газа, перед шагом (в) и/или к потоку сингаза (26) перед шагом (г) добавляют поток  $H_2$  (36, 136, 236), и

20 причем подача, по меньшей мере, части потока сингаза (26) в доменную печь происходит через шахту (38) доменной печи.

2. Способ эксплуатации доменной печи (212) путем повышения эффективности использования водорода в доменной печи (212), причем способ включает в себя комбинацию добавления  $H_2$  в доменную печь с реакцией риформинга, причем часть использования водорода в установке доменной печи, включающей в себя доменную печь (212), установку (218) риформинга и кауперную установку (221), составляет более 60% от водорода, подаваемого в доменную печь, и предпочтительно более 65% от водорода, подаваемого в доменную печь, причем использование водорода определяется как: (подвод водорода в установку доменной печи - отвод водорода из установки доменной печи)/(подвод водорода в доменную печь), причем подаваемый в доменную печь водород определяется как общее содержание водорода в газе в когезионной зоне доменной печи и в шахтном газе, подаваемом в доменную печь на уровне шахты (240), и подаваемый в доменную печь водород составляет общий поток по

меньшей мере 200 Нм<sup>3</sup>/т произведенного горячего металла, из которого по  
меньшей мере 50 Нм<sup>3</sup>/т горячего металла подается в установку доменной печи в  
виде молекулярного водорода Н<sub>2</sub> (236), причем подводимый в доменную печь  
водород включает в себя, прежде всего, водород, содержащийся в сингазе (226),  
5 в инжектируемом молекулярном водороде Н<sub>2</sub> (236), в других  
водородсодержащих газах (224), в инжектируемом угле и/или смоле, во  
влажности инжектируемых газов (224) и твердого топлива (229) и во влажности  
горячего дутья (230).

10 3. Способ по п. 1, причем подача, по меньшей мере, части потока сингаза  
(26) в доменную печь происходит через шахту (38) доменной печи и через по  
меньшей мере одну фурму (30) доменной печи.

15 4. Способ по п.п. 1, 2 или 3, причем, по меньшей мере, часть  
подаваемого в установку доменной печи водорода впрыскивают через фурму  
доменной печи.

20 5. Способ по одному из предшествующих пунктов, причем подача, по  
меньшей мере, части потока сингаза (26) в доменную печь происходит через  
шахту (38) доменной печи и через фурму (30) доменной печи.

6. Способ по одному из предшествующих пунктов, причем поток Н<sub>2</sub> (36,  
236) добавляют к потоку сингаза (26, 226) с температурой ниже 600°С.

25 7. Способ по одному из предшествующих пунктов, причем поток  
доменного газа и/или поток углеводородсодержащего газа подвергают  
гидрированию и/или десульфуризации в блоке (250) гидрирования и  
десульфуризации выше по потоку от установки (218) риформинга.

30 8. Способ по п. 7, причем, по меньшей мере, часть водорода добавляют в  
поток углеводородсодержащего газа выше по потоку от блока (250)  
гидрирования и десульфуризации.

9. Способ по одному из предшествующих пунктов, причем поток  $H_2$  (36) производят путем электролиза в электролизной ячейке (32).

5 10. Способ по п. 9, причем электроэнергия (34) для работы электролизной ячейки (32) производят посредством возобновляемого источника, такого как ветер, солнце и/или гидроэнергия.

10 11. Способ по одному из предшествующих пунктов, причем углеводородсодержащий газ (24) включает в себя природный газ, коксовый газ и/или биогаз.

15 12. Способ по одному из предшествующих пунктов, причем по меньшей мере один риформер установки (18) риформинга является регенеративным риформером.

20 13. Способ по одному из предшествующих пунктов, причем по меньшей мере один риформер установки (18) риформинга представляет собой каталитический сухой и/или мокрый риформер любого типа, прежде всего с нижним, боковым, террасовым или верхним обжигом.

25 14. Способ по одному из предшествующих пунктов, причем установка (18) риформинга включает в себя два риформера, прежде всего предварительный риформер и основной риформер.

30 15. Способ по одному из предшествующих пунктов, причем риформинг на шаге (в) осуществляют некаталитически.

16. Способ по одному из предшествующих пунктов, причем риформинг на шаге (в) сочетают с частичным окислением углеводородов.

17. Способ по одному из предшествующих пунктов, причем восстановительный потенциал сингаза (26, 28), полученного на шаге (в), составляет более 6, предпочтительно более 7, более предпочтительно более 7,5,

причем восстановительный потенциал определяется молярным соотношением  $(cCO+cH_2)/(cH_2O+cCO_2)$ .

5 18. Способ по одному из предшествующих пунктов, причем риформинг на шаге (в) осуществляют при температуре выше примерно  $900^{\circ}C$ , предпочтительно выше примерно  $950^{\circ}C$ , более предпочтительно выше примерно  $1000^{\circ}C$ .

10 19. Способ по одному из предшествующих пунктов, причем поток доменного газа (10) также подвергают шагу охлаждения газа и/или очистки и/или нагнетания давления, предпочтительно шагу удаления паров, шагу удаления пыли, шагу удаления металлов, шагу удаления  $HCl$  и/или шагу удаления сернистых компонентов, перед подачей в риформер (18).

15 20. Способ по одному из предшествующих пунктов, причем после шага очистки к углеводородсодержащему газу (24) и/или к доменному газу добавляют поток пара.

20 21. Способ по одному из предшествующих пунктов, причем в горелках установки риформинга используют поток доменного газа.

25 22. Установка доменной печи, включающая в себя доменную печь (12, 112, 212), имеющую шахту, фурмы для подачи первого потока водородсодержащего газа в доменную печь, и газовые вводы в шахте доменной печи для подачи потока сингаза в доменную печь, причем установка доменной

30 установки (18, 118, 218) риформинга, включающую в себя по меньшей мере один риформер в гидродинамическом соединении с колошником доменной печи (12, 112, 212) и с источником углеводородсодержащего газа (24, 124, 224), причем риформер расположен для преобразования потока доменного газа и углеводородсодержащего газа в поток сингаза и находится в гидродинамическом соединении ниже по потоку с газовыми вводами в шахте доменной печи, и

источник потока  $H_2$  (36, 136, 236), находящийся в гидродинамическом соединении по меньшей мере с одним риформером и/или с газовыми вводами в шахту и/или фурмой доменной печи.

23. Установка доменной печи по п. 22, причем установка доменной печи выполнена для осуществления способа эксплуатации доменной печи по одному из п.п. 1-21.

5

24. Установка доменной печи по п. 22 или п. 23, в которой риформер находится в гидродинамическом соединении ниже по потоку с фурмой доменной печи и с газовыми вводами в шахте доменной печи.

10 25. Установка доменной печи по одному из п.п. 22-24, причем установка (18) риформинга включает в себя регенеративный риформер.

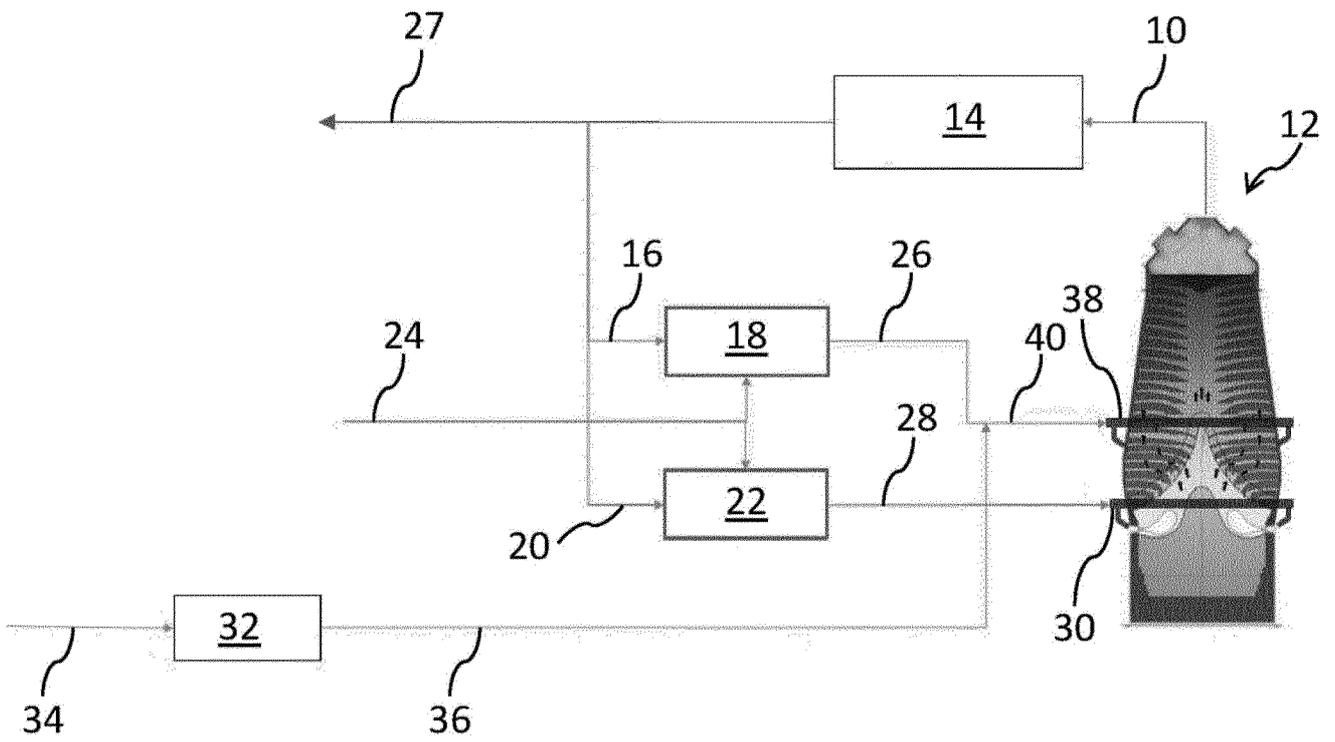
15 26. Установка доменной печи по одному из п.п. 22-25, причем установка (18) риформинга включает в себя каталитический сухой и/или мокрый риформинг, и/или установка (18) риформинга включает в себя два риформера, прежде всего предварительный риформер и основной риформер.

20 27. Установка доменной печи по одному из п.п. 22-26, причем установка (18) риформинга также включает в себя реактор частичного окисления.

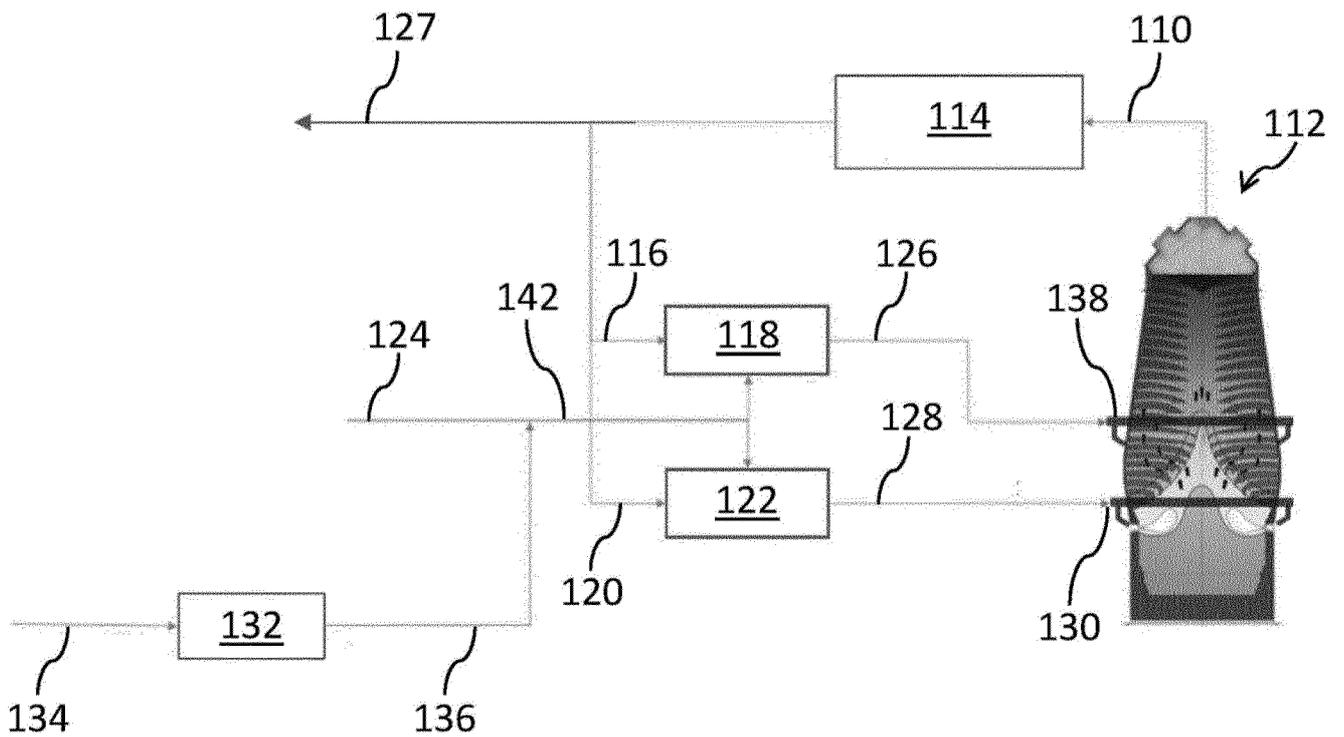
25 28. Установка доменной печи по одному из п.п. 22-27, причем гидродинамическое соединение с колошником доменной печи, предназначенное для подачи потока доменного газа в установку риформинга, также включает в себя установку охлаждения газа и/или очистки и/или нагнетания давления, предпочтительно блок удаления паров, блок удаления пыли, блок удаления металлов, блок удаления HCl и/или блок удаления сернистых компонентов.

30 29. Установка доменной печи по одному из п.п. 22-28, причем гидродинамическое соединение с колошником доменной печи, предназначенное для подачи потока доменного газа в установку риформинга, также включает в себя в себя блок нагнетания (215) давления и/или блок (250) гидрирования и десульфуризации.

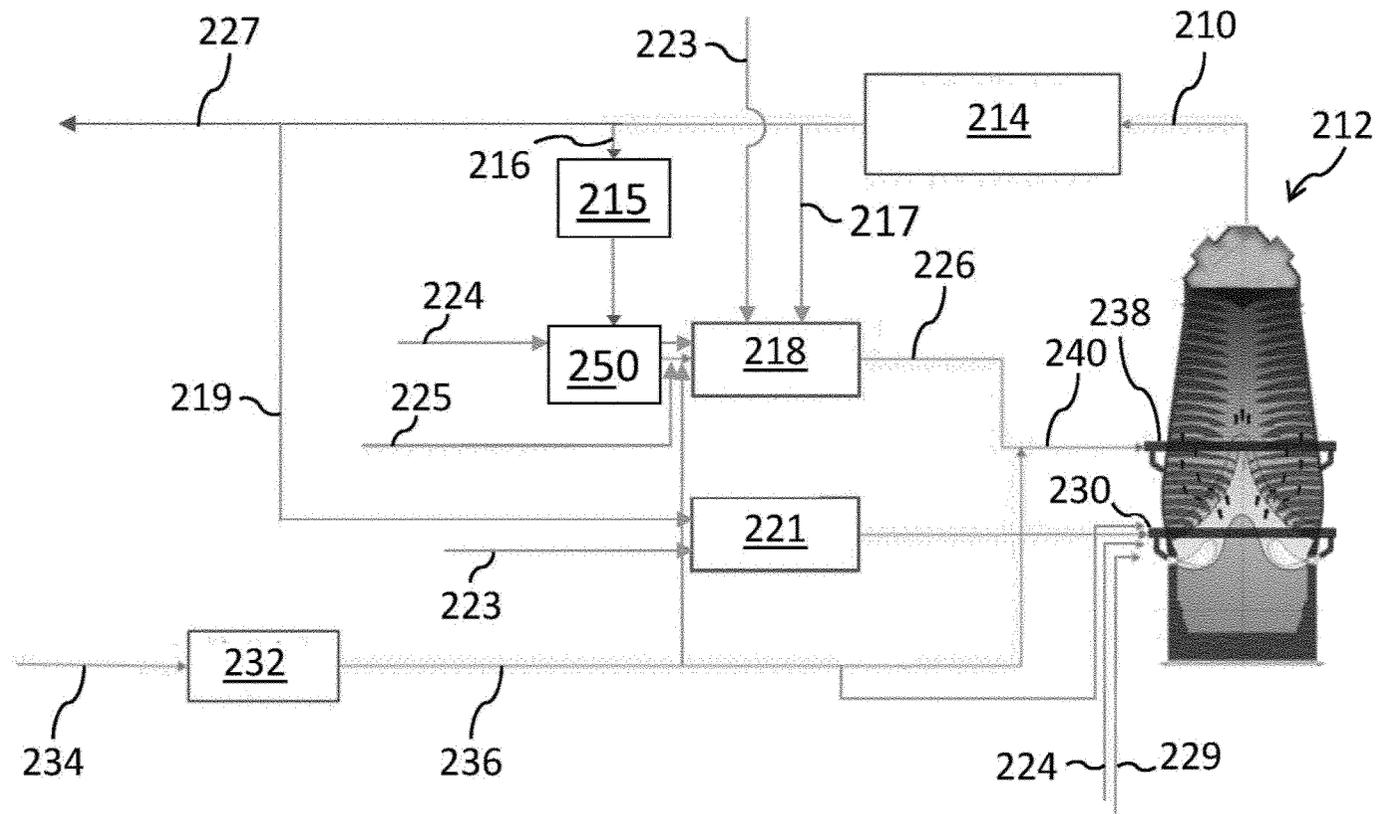
1/3



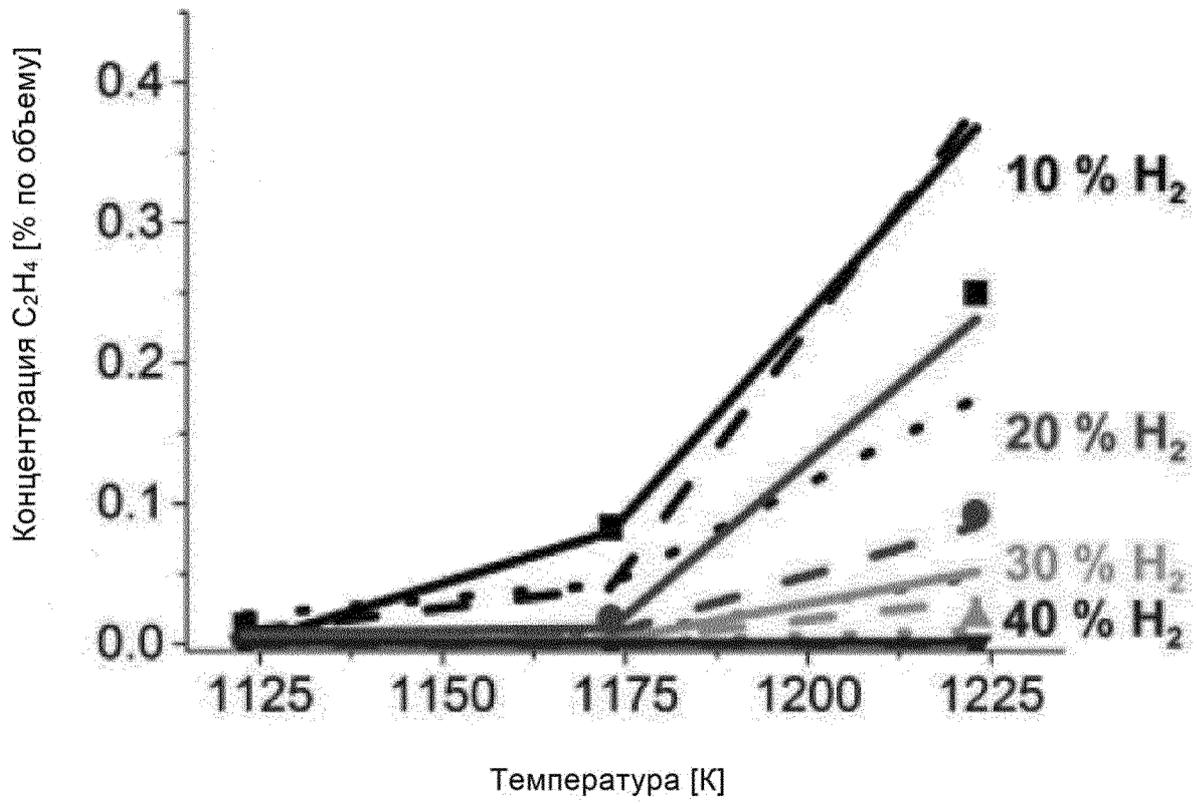
Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4