

(19)



**Евразийское  
патентное  
ведомство**

(11) **046713**

(13) **B1**

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

(45) Дата публикации и выдачи патента  
**2024.04.15**

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

(21) Номер заявки  
**202391799**

(22) Дата подачи заявки  
**2021.12.17**

---

(54) **СПОСОБ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЖЕЛЕЗА ПРЯМОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ**

---

(31) **LU102327; 21153083.7**

(56) **CN-A-108374067  
WO-A1-2020245070  
US-A1-2020385827**

(32) **2020.12.18; 2021.01.22**

(33) **LU; EP**

(43) **2023.09.11**

(86) **PCT/EP2021/086477**

(87) **WO 2022/129515 2022.06.23**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:  
**ПАУЛЬ ВЮРТ С.А. (LU)**

(72) Изобретатель:  
**Кастаньола Кристиано, Кравино  
Фабио, Илаккуа Сильвия, Маньяни  
Стефано, Круль Ян (IT)**

(74) Представитель:  
**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)**

---

(57) Изобретение относится к производству железа прямого восстановления (DRI), в котором прямое восстановление водородом синергетически эксплуатируется в контексте промышленного предприятия. Восстановление водородом оперирует с восстановительным газом, содержащим по меньшей мере 85 % по объему водорода, и получает поток подпиточного водорода. По меньшей мере, часть потока подпиточного водорода производится на месте посредством одного из: электролизных средств, выполненных для производства водорода из полученного от одного или более компонентов промышленного предприятия пара и/или выработанного с использованием отходящего тепла пара и/или выделяемых одним или более компонентами горячих газов, и реакторных средств сдвига газа, выполненных для превращения СО-содержащего газа, выделяемого по меньшей мере одним компонентом промышленного предприятия, в водород и для удаления СО<sub>2</sub>.

---

**046713**  
**B1**

**046713**  
**B1**

### Уровень техники

Необходимость, а также обязанность снижения общих выбросов CO<sub>2</sub> оказывают влияние на сталелитейную промышленность как на главного ответственного участника. Всемирная декарбонизация призывает производителей стали к переходу к более экологически безопасному производству, основанному на процессе получения железа прямого восстановления (DRI) с помощью водорода (H<sub>2</sub>).

Водород является новым ключевым фактором для снижения CO<sub>2</sub> в настоящее время и, прежде всего, для будущей декарбонизации производства стали (зеленый водород).

В настоящее время главными утвердившимися процессами производства водорода являются:

i) паровой реформинг природного газа.

Этот процесс является наиболее распространенным и самым дешевым источником промышленного водорода.

Природный газ нагревается до 700-1100°C в присутствии пара и никелевого катализатора. Молекулы метана разрушаются с образованием монооксида углерода и водорода. Газообразный монооксид углерода проходит с паром над оксидом железа или другими оксидами и посредством реакции сдвига фаз вода-газ получается дополнительный водород.

Производство водорода таким способом является экономически привлекательным, но требует ископаемых топлив и захвата CO<sub>2</sub> для предотвращения выбросов;

ii) электролизные средства.

Электролизные средства на основе воды состоят из нескольких ячеек, причем каждая состоит из одного анода и одного катода, погруженных в электролитический раствор и соединенных с источником питания. Электричество разлагает входной поток воды на водород и кислород.

Вместо этого, питаемые паром электролизные средства используют пар в качестве входного сырья для получения водорода и кислорода, основываясь приблизительно на тех же принципах, что и основанные на воде установки.

Питаемые водой электролизные средства являются дорогостоящими с точки зрения CapEx (капитальных затрат) и OpEx (производственных затрат).

Питаемые паром электролизные средства являются дорогостоящими с точки зрения CapEx и OpEx, но менее с менее высокими OpEx, чем питаемые водой установки вследствие более высокой эффективности.

### Цель создания изобретения

Таким образом, получение водорода в настоящее время связано с высокими затратами, так что основной движущей силой является поиск новых и альтернативных и экологически безопасных решений по использованию водорода, снижающих связанные затраты.

### Краткое изложение сущности изобретения

Настоящее изобретение направлено на поиск привлекательных конфигураций для получения водорода экологически безопасным и конкурентоспособным образом при размещении в промышленной среде. Настоящее изобретение раскрывает установку и способ получения DRI в установке DR водородом.

Получение водорода (H<sub>2</sub>) для установки DR водородом реализуется посредством новаторских конфигураций с использованием установки реактора сдвига фаз вода-газ и/или питаемой паром гидролизной установки для эксплуатации энергоносителей, уже имеющихся в комплексных сталеплавильных цехах (или в более общем смысле на промышленных предприятиях), для получения водорода.

Вышеупомянутыми энергоносителями являются пар и/или CO-содержащий газ.

Согласно изобретению способ изготовления DRI включает в себя:

эксплуатацию установки DR водородом, причем железная руда восстанавливается в шахтной печи в водородной восстановительной атмосфере, причем шахтная печь соединена с контуром технологического газа, расположенным для приема колошникового газа от шахтной печи, обработки колошникового газа перед его нагреванием в нагревательном устройстве, и возвращения к печи восстановительного газа, содержащего по меньшей мере 85% по объему водорода, причем поток водорода (обычно называемого подпиточным водородом) добавляют к контуру технологическому газу выше по потоку от нагревательного устройства,

эксплуатацию промышленной установки, вырабатывающей CO-содержащий газ и/или пар и/или отходящее тепло и/или горячие газы, причем, по меньшей мере, часть потока водорода (потока подпиточного водорода) вырабатывается посредством по меньшей мере одного из:

электролизных средств, выполненных для производства водорода из извлеченного от одного или более компонентов промышленного предприятия пара и/или пара, выработанного посредством средств рекуперации тепла, выполненных для выработки пара из отходящего тепла, и/или выделяемых одним или более компонентами горячих газов, и

реакторных средств сдвига газа, выполненных для превращения CO-содержащего газа, выделяемого по меньшей мере одним компонентом промышленного предприятия, в богатый водородом газ, и, предпочтительно, для удаления CO<sub>2</sub>.

"Установка DR водородом" может быть установкой DR, питаемой водородом в качестве восстановительного газа, причем содержание водорода в восстановительном газе находится между 85 и 100 % по

объему, предпочтительно больше 85 или 90 % по объему, например между 90 и 95 % по объему. Такая установка DR обычно включает в себя шахтную печь и связанный с ней контур рециркуляции газа, известный как контур технологического газа, посредством которого колошниковый газ печи обрабатывается (обычно очищается и сжимается) и нагревается для рециркуляции в печь в качестве восстановительного газа с вышеуказанным содержанием водорода. Факультативный контур топочного газа (с использованием части рециркулируемого колошникового газа) может быть использован для целей нагрева в нагревательном устройстве. Водород, обеспечиваемый потоком водорода, обычно называемый потоком подпиточного водорода, добавляется к контуру технологического газа в количествах, достаточных для достижения вышеупомянутого диапазона концентрации водорода в соответствии с технологическими требованиями. Таким образом, роль подпиточного водорода заключается в добавлении некоторого количества водорода в технологический контур для достижения требуемой рабочей концентрации  $H_2$  в восстановительном газе. Поток подпиточного водорода обычно может иметь концентрацию  $H_2$  от 90 до 100 % по объему. Установка DR водородом обычно может быть водородной установкой MIDREX  $H_2$ .

Пар может быть получен от любого компонента промышленного предприятия, где может иметься пар. Альтернативно или дополнительно, пар может получаться посредством любого хорошо известного оборудования для рекуперации тепла с использованием источников отходящего тепла в промышленном процессе, которое иначе будет представлять собой тепловые потери. Оборудование для рекуперации тепла обычно может включать в себя теплообменник, выполненный для введения в теплообменную связь горячих газов/отходящего тепла для выработки пара. Оборудование для рекуперации тепла может, например, включать в себя котел, где вода нагревается посредством горячих газов/отходящего тепла.

Выработанный таким образом пар подается к одному или более питаемым паром электролизному средству, которые могут превращать пар в водород и кислород путем использования электричества. Могут быть использованы соответствующие электролизные средства, способные выделять кислород из водяного пара, например электролитическая ячейка твердооксидного электролизера (SOEC).

СО-содержащий газ представляет собой любой имеющийся в наличии промышленный газ со значительным содержанием монооксида углерода (например, по меньшей мере 20 % по объему, в некоторых вариантах осуществления от 20 до 25 % по объему, но могут быть использованы другие газы с более высокими концентрациями СО). В контексте производства чугуна СО-содержащий газ может быть любым имеющимся на заводе металлургическим газом со значительным содержанием монооксида углерода (например, доменным (BF) газом, конвертерным (BOF) газом, TGF-газом, отходящим газом погружной дуговой печи (SAF) и т.п.), предпочтительно с низким содержанием азота. С помощью оборудования, основанного на технологии сдвига фаз вода-газ (WGS) и удалении  $CO_2$ , СО-содержащий газ превращается в поток диоксида углерода  $CO_2$ , который отделяется от остального, то есть по существу богатого водородом потока. Могут быть использованы разные технологии, такие как используемые согласно уровню техники для захвата  $CO_2$  при предварительном сжигании. В дальнейшем это оборудование будет называться реакторной установкой сдвига газа (GSRP). Как известно из уровня техники, GSRP может включать в себя WGS реактор, объединенный с устройством захвата  $CO_2$  (например, аминные технологии). Альтернативно, могут быть использованы объединенные технологии, где один реактор выполнен для реализации WGS реакции и отделения  $CO_2$ . Эти технологии известны из уровня техники и не требуют подробного описания.

Любые обычная питаемые паром электролизные средства, любая GSRP установка и любое оборудование для рекуперации тепла, приспособленное для выработки пара, может быть использовано в контексте изобретения.

В вариантах осуществления установка DR водородом объединена с установкой DR природным газом, имеющейся на промышленной предприятии.

Установка DR природным газом обычно может быть установкой MIDREX NG (с использованием природного газа), альтернативно она может быть заменена на установку MIDREX MxCol (с использованием полученного газификацией угля газа) или установку NG/ $H_2$  (использованием природного газа/водорода).

Установка DR природным газом классически эксплуатируется на реформированном природном газе для получения DRI из железной руды. Она включает в себя другую шахтную печь и другой контур технологического газа, причем другой контур технологического газа включает в себя средства нагрева-реформинга для выработки сингаза из природного газа (и рециркулированного технологического газа). Этот сингаз используется в дополнительной шахтной печи в качестве восстановительного газа, причем типичный состав подаваемого к печи восстановительного газа приблизительно составляет 30-34 % по объему СО, 0-4 %  $CO_2$ , 50-55 %  $H_2$ , 2-6 %  $H_2O$ , 1-4 %  $CH_4$ , 0-2 %  $N_2$ .

Специалисту в данной области будет понятно, что установка DR природным газом выделяет колошниковый газ, который является горячим газом и содержит СО. Обычная установка DR природным газом может синергетически эксплуатироваться с установкой DR водородом для снижения потребности в водороде из внешних источников. То же самое может быть сделано для установок MxCol и NG/ $H_2$ .

В вариантах осуществления способ включает в себя рекуперацию тепла из установки DR природным газом для выработки пара и производства водорода в электролизных средствах.

Это может быть сделано в нескольких местоположениях в установке DR природным газом:

установка рекуперации может быть расположена в другом контуре технологического газа установки DR природным газом, прежде всего выше по потоку от установки пылеулавливания, для рекуперации тепла из рециркулируемого колошникового газа и выработки пара для подачи к электролизным средствам,

средства рекуперации тепла могут быть расположены для рекуперации тепла из топочного газа от средств нагрева-реформинга контура технологического газа установки DR природным газом, прежде всего перед вытяжной трубой установки DR природным газом, для выработки пара,

средства рекуперации тепла могут быть расположены для рекуперации тепла из горячего DRI (в его разных формах, например HDRI (горячего железа прямого восстановления), HBI (горячебрикетированного железа) или CRDI (холодного железа прямого восстановления), производимого установкой DR природным газом.

Пар может быть выработан путем рекуперации тепла одинаковым образом (в одинаковом месте) в установках  $MxCoI$  и  $NG/H_2$  для получения водорода посредством электролиза.

Промышленное предприятие обычно может включать в себя электродуговую печь EAF, прежде всего для плавления DRI в одной из установок DR или в другом месте. Предпочтительно, средства рекуперации тепла могут быть выполнены для рекуперации тепла из горячих газов/отходящего тепла, выделяемого EAF, для выработки пара (подаваемого к электролизным средствам).

В вариантах осуществления способ включает в себя извлечение CO-содержащего газа из установки DR природным газом и подачи выделенного CO-содержащего газа к установке реактора газа для получения водорода.

Первый поток CO-содержащего газа может быть ответвлен от контура технологического газа, предпочтительно, ниже по потоку от компрессорных средств. Второй поток CO-содержащего газа может быть ответвлен после установки пылеулавливания.

В вариантах осуществления способ может включать в себя рекуперацию тепла посредством одной или более установок рекуперации тепла, расположенных в одном или более местоположениях в установке DR водородом, и подачу выработанного пара к электролизным средствам.

Средства рекуперации тепла могут быть также расположены в контуре технологического газа установки DR водородом, прежде всего выше по потоку от установки пылеулавливания, для рекуперации тепла от рециркулируемого колошникового газа и выработки пара, подаваемого к электролизным средствам. Средства рекуперации тепла могут быть расположены для рекуперации тепла от горячего DRI, произведенного посредством установки DR водородом для выработки пара, подаваемого к электролизным средствам.

В общем, средства рекуперации тепла могут быть расположены для рекуперации тепла от одного или нескольких компонентов промышленного предприятия, прежде всего EAF, от одной или более систем рекуперации тепла от DRI (от любой установки DR) или от любых установок DR.

Согласно другому аспекту изобретение относится к установке, включающей в себя:

промышленное предприятие, включающее в себя по меньшей мере один компонент, вырабатывающий CO-содержащий газ, отходящее тепло и/или пар и/или горячие газы,

установку прямого восстановления (DR) водородом, включающую в себя шахтную печь, в которой железная руда восстанавливается в водородной восстановительной атмосфере, и контур технологического газа, расположенный для приема колошникового газа от шахтной печи, обработки колошникового газа перед его нагреванием в нагревательном устройстве, и возвращения к печи восстановительного газа, включающего в себя по меньшей мере 80 % по объему водорода, причем поток водорода добавляется в контур технологического газа выше по потоку от нагревательного устройства,

средства производства водорода, включающих в себя по меньшей мере одно из:

i) электролизных средств, выполненных для производства водорода из пара, полученного от одного или более компонентов промышленного предприятия, и/или из пара, выработанного посредством установок рекуперации, выполненных для выработки пара из отходящего тепла и/или горячих газов, выделяемых одним или более компонентами, и

ii) реакторных средств сдвига газа, выполненных для превращения CO-содержащего газа, выделяемого промышленным предприятием, в водород (предпочтительно, с контекстным удалением  $CO_2$ ),

причем поток(-и) водорода, произведенный(-е) посредством средств производства водорода, по меньшей мере, частично подается(-ются) к установке DR водородом для добавления в контур технологического газа.

Эта промышленная установка обычно может быть выполненной для реализации описанного выше способа.

Согласно другому аспекту изобретение относится к способу эксплуатации установки DR водородом, включающему в себя рекуперацию тепла посредством средств рекуперации тепла, расположенных в одном или более местоположениях в установке DR водородом и подающей выработанный пар к электролитической установке для производства водорода, который в свою очередь подают к контуру технологического газа установки DR водородом.

Средства рекуперации тепла могут быть расположены в контуре технологического газа установки DR водородом, прежде всего выше по потоку от установки пылеулавливания, для рекуперации тепла от рециркулируемого колошникового газа и выработки пара, подаваемого к электролизным средствам.

Средства рекуперации тепла могут быть расположены для рекуперации тепла из системы рекуперации тепла DRI установки DR водородом для выработки пара, подаваемого к электролизным средствам.

Согласно еще одному аспекту изобретение относится к системе для реализации вышеописанного способа (см. также приведенный ниже вариант осуществления 4).

#### **Краткое описание чертежей**

Теперь настоящее изобретение будет описано для примера со ссылкой на прилагаемые чертежи, на которых фигуры 1-4 относятся к разным вариантам осуществления настоящего изобретения.

Подробное описание предпочтительных вариантов осуществления.

Промышленные предприятия характеризуются наличием пара и CO-содержащего газа. В этом контексте установка прямого восстановления водородом (например, MIDREX® H<sub>2</sub>) становится полностью интегрированной в существующее производственное предприятие согласно нижеследующим вариантам осуществления.

Как будет показано, настоящее изобретение предлагает конфигурации, в которых установка DR полностью интегрирована в промышленное предприятие, прежде всего металлургический завод. Изобретение фокусируется на поддержке установки DR водородом в отношении производства H<sub>2</sub> посредством использования синергизма в этих промышленных предприятиях.

В описанных ниже вариантах осуществления работающие на водороде установки DR относятся, например, являются установками MIDREX H<sub>2</sub><sup>TM</sup> типа.

В некоторых вариантах осуществления работающие на водороде установки DR установлены на площадке с эксплуатируемой на природной газе установкой DR, которая, например, является установкой MIDREX NG типа.

Вариант осуществления №1 - см. инновационную схему согласно фиг. 1.

Что касается фиг. 1, то на ней показан первый вариант осуществления изобретения, в котором установка 10 DR водородом, эксплуатируемая с водородом в качестве восстановительного газа, интегрирована в существующее металлургическое предприятие 12.

Установка 10 DR обычно соответствует процессу MIDREX H<sub>2</sub>. Как известно, она включает в себя вертикальную шахту 16 с верхним загрузочным отверстием 18 и нижним разгрузочным отверстием 20. Шихту из железной руды в виде комков и/или в гранулированной форме загружается в верхнюю часть печи и свободно опускается посредством силы тяжести через восстановительный газ. Во время перемещения от загрузочного отверстия к разгрузочному отверстию шихта остается в твердом состоянии. Восстановительный газ (состоящий в основном из H<sub>2</sub>) вводится в шахтную печь сбоку, как показано стрелкой 22, в основание восстановительной секции, протекая вверх через слой руды. Восстановление оксидов железа происходит в верхней секции печи в богатой H<sub>2</sub> восстановительной атмосфере при температурах в диапазоне 850-950°C. Твердый продукт, то есть прямо восстановленное железо (DRI) или восстановленное губчатое железо, выгружается после охлаждения или в горячем состоянии, обозначается как CDRI (холодное DRI), HDRI (горячее DRI) и HBI (горячебрикетированное железо).

Согласно процессу MIDREX H<sub>2</sub> в качестве восстановительного газа для печи DR используется почти чистый водород.

Идеальное содержание водорода в восстановительном газе составляет 100 %. На практике содержание H<sub>2</sub> может изменяться между 85 и 100 % по объему с остатком, составленным из N<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O и CH<sub>4</sub>. Эти составные части определяются чистотой подпиточного водорода и возможным добавлением природного газа, как известно из уровня техники.

Специалисту в данной области будет понятно, что MIDREX H<sub>2</sub> подобен стандартному процессу MIDREX® с природным газом за исключением того, что входной газообразный H<sub>2</sub> вырабатывается за пределами процесса. Итак, должен выполняться не процесс реформинга, а только теплопередача для нагревания газа до требуемой температуры.

Поскольку H<sub>2</sub> превращается в H<sub>2</sub>O и конденсируется в газоочистителе колошникового газа, система удаления CO<sub>2</sub> не требуется (за исключением упомянутого выше особенно большого добавления природного газа).

Согласно фигуре, печь 16 DR соединена с контуром 24 рециркуляции колошникового газа (или контуром технологического газа), включающим в себя газоочиститель 26, компрессорное устройство 28 и нагревательное устройство 30. Таким образом, выходящий из печи 16 DR колошниковый газ протекает через газоочиститель 26, где удаляется пыль и конденсируется вода, и далее к компрессорному устройству 28. Количество водорода в контуре 24 технологического газа регулируют путем добавления потока водорода, называемого "подпиточным водородом", в зависимости от требований процесса.

Содержание H<sub>2</sub> в потоке подпиточного водорода, предпочтительно, составляет от 90 до 100 %. Поток подпиточного водорода - источник водорода обозначен как прямоугольник 32 "подпиточный водород" - вводят в контур 24 рециркуляции между компрессорным устройством 28 и нагревательным уст-

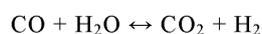
ройством 30. Затем газ нагревают до требуемого температурного диапазона в нагревательном устройстве 30, посредством чего восстановительный газ готов для ввода в печь 16. Энергия нагрева может быть подаваемой к нагревательному устройству 30 посредством экологически безопасных источников тепла, таких как отходящее тепло, электроэнергия, водород, биомасса и/или природный газ, требуемый в качестве топлива для нагревательного устройства.

Из данного описания понятно, что большая часть требуемого для процесса восстановления потока водорода может быть произведена на месте, поступая к узлу 32. Факультативно,  $H_2$  может быть добавлен из внешнего источника, хотя это обычно должно составлять незначительную часть добавляемого к контуру технологического газа потока водорода.

Пар S1 получают от промышленного предприятия 12, где он может иметься, или может быть получен посредством стандартного оборудования для рекуперации тепла. Например, отходящий газ направляют к теплообменнику для получения пара из воды (например, получение пара бойлерного типа). Произведенный и/или полученный обратно пар может быть использован для питания питаемой паром электролизной установки 3 и получения потока A1 водорода, направляемого к установке DR водородом.

Другой поток S2 пара, полученный обратно или выработанный промышленным предприятием 12 может питать установку 1 реактора сдвига фаз вода-газ совместно с CO-содержащим газом G1, происходящим из газов, вырабатываемых разными процессами, присутствующих на предприятии 12.

Реакторная установка 1 сдвига газа GSRP выполнена для реализации реакции сдвига фаз вода-газ, которая описывает реакцию монооксида углерода и водяного пара с образованием диоксида углерода и водорода:



GSRP 1 может быть основана на любой подходящей технологии. Таким образом, она питается двумя потоками (пар S2 и CO-содержащий газ G1) от промышленного предприятия для производства двух главных потоков, содержащих, с одной стороны, диоксид углерода и, с другой стороны, богатый водородом поток, обозначенный как поток A2. Здесь следует понимать, что GSRP 1 также выполнена для отделения  $CO_2$ , который может быть, таким образом, удален из процесса. GSRP 1 может быть обычной, основанной на любой подходящей технологии.

Вытекающий из GSRP 1 богатый водородом поток может быть факультативно пропущен через устройство 2 удаления азота (например, с использованием мембран или адсорбции с перепадом давления) для выделения  $N_2$  из газового потока.

Полученный таким образом поток A2 водорода подают к узлу 32, где его смешивают с первым потоком A1 и возможно с другим потоком  $H_2$ , приходящим из внешнего источника. Объединенный таким образом поток водорода вводят в контур 24 рециркуляции колошникового газа.

Поток G1 CO-содержащего газа может быть сжат выше по потоку от GSRP 1 посредством компрессорного устройства 34. Система 36 восстановления давления (турбина) может быть расположена ниже по потоку от установки 1 реактора сдвига фаз вода-газ WGS для возвращения энергии из потока A2 водорода и выработки энергии для питания компрессора 34.

С этим интегрированным решением большинство водорода, требуемого для процесса восстановления водородом, может быть обеспечено самовырабатываемым в интегрированном предприятии водородом.

Специалисту в данной области будет понятен потенциал рекуперации тепла стандартных сталелитейных заводов, основанных на технологическом маршруте BF-BOF (то есть, на паре, произведенном посредством рекуперации тепла в охладителе агломерата, посредством сухого тушения и т.п.). Аналогично специалисты в данной области легко определяют количество и типы CO-содержащих газов, имеющих у стандартного сталеплавильного завода, основанного на маршруте BF-BOF маршруте (то есть, BF газе, BOF газе, отходящем SAF газе и т.п.).

Особенно интересной конфигурацией является показанная установка DRI-EAF. Обычная практика установок DRI-EAF ограничена рекуперацией тепла, CO-содержащие газы являются ни обычно доступными, ни рентабельно используемыми.

Таким образом, настоящее изобретение в одном из вариантов осуществления использует отходящее тепло и CO-содержащий газ от электродуговой печи для получения  $H_2$  посредством электролиза и реакции сдвига фаз вода-газ. Это делает возможным снижение зависимости от внешних источников  $H_2$  для эксплуатации установки DR.

Можно отметить, что конфигурация согласно фиг. 1 делает возможным избирательную эксплуатацию, основанную на паре или CO-содержащем газе. То есть можно эксплуатировать установку DR с  $H_2$ , произведенным из пара, выработанного посредством рекуперации тепла от промышленного предприятия (то есть, посредством электролиза), или с  $H_2$ , произведенным из CO-содержащего газа установкой GSRP, или с обоими видами  $H_2$ .

Вариант осуществления № 2 - схема согласно фиг. 2.

Вариант осуществления 2 является более подробным случаем варианта 1, когда установка 10 MIDREX  $H_2$  встроена в существующую установку 40 MIDREX NG.

Как известно специалисту в данной области, установка 40 MIDREX NG обычно включает в себя

шахтную печь 42 и контур 44 рециркуляции колошниковога газа с газоочистителем 46 колошниковога газа, компрессор 48 технологического газа, систему 50 рекуперации тепла и печь 52 реформинга. Показанное на фиг. 2 размещение системы 50 рекуперации тепла и печи 52 реформинга является обычным для установки MIDREX NG, где сингаз (главным образом CO и H<sub>2</sub>) образуется в печи 52 реформинга посредством реформинга природного газа. CO-содержащий рециркулируемый колошниковый газ вместе с природным газом, образующие восстановительный питающий газ для печи, предварительно нагревают в системе 50 рекуперации тепла и затем вводят в реакцию в печи 52 реформинга для выработки потока сингаза SG. Природный газ, часть колошниковога газа и воздух сжигают в печи 52 реформинга для поддержания реакции реформинга и дымовые газы направляют к системе 50 рекуперации тепла и далее ниже по потоку в окружающую среду (вытяжная труба 54).

Понятно, что сталеплавильный цех, состоящий из установки 40 MIDREX NG и электродуговой печи 12 имеет разные источники отходящего тепла, которые могут быть использованы для выработки пара для питания питаемой паром электролизной установки 3 и производства водорода, показанного как поток A1, для использования в установке 10 MIDREX H<sub>2</sub>.

Выработку пара выполняют посредством оборудования для рекуперации тепла/выработки пара (например, бойлерного типа), расположенного в одном или более следующих местоположений:

установки 5 рекуперации тепла/выработки пара на выходе колошниковога газа (позиция 5) на контуре 44 рециркуляции, вырабатывающей поток S4 пара,

установки 6 рекуперации тепла/выработки пара на линии топочнога газа перед входом в вытяжную трубу, вырабатывающей поток S2 пара,

установки 7 рекуперации тепла/выработки пара на EAF 12, вырабатывающей поток S1 пара, и

установки 8 рекуперации тепла/выработки пара, расположенной для рекуперации тепла от системы охлаждения HBI, вырабатывающей поток S5 пара. Здесь теплота извлекается из выгруженного из печи 42 HBI, но также может быть получена посредством тепла, удаленного из системы охлаждения CDRI.

Разные потоки S1-S5 пара объединяют посредством смесительных узлов 56, 56 для образования суммарного потока S6, подаваемого к электролизным средствам 3, где производится поток A1 водорода и подается через узел 32 (подпитка водородом) к контуру 24 рециркуляции эксплуатируемой на водороде установки 10 DR.

Произведенный всеми установками рекуперации тепла суммарный поток объединяет и уменьшает требуемую подпитку водородом от внешних источников в разных пропорциях согласно размерам каждого блока установки MIDREX.

По сравнению с установкой MIDREX NG производительностью 1 миллион тонн в год (МТПУ), для установки MIDREX H<sub>2</sub> возможна экономия приблизительно 60-70 % общего металлургического водорода производительностью 1 миллион тонн в год.

Вариант осуществления № 3 - схема согласно фиг. 3.

Вариант осуществления 3 представляет собой дополнительный подробный случай варианта 1, альтернативного (или дополнительного) варианту осуществления 2.

Здесь установка 10 DR водородом снова связана с установкой 40 DR природным газом.

Часть CO-содержащего газа, выработанного посредством процесса восстановления NG, а именно здесь поток R2 топливного колошниковога газа и/или поток R1 технологического газа, берут из контура 44 рециркуляции NG и направляют к GSRP 1 для производства потока C1 водорода для процесса восстановления водородом. Поток CO<sub>2</sub> B1, выработанный посредством GSRP 1, по меньшей мере, частично повторно вводят в процесс восстановления NG для удовлетворения заранее установленному отношению CO<sub>2</sub> в процессе реформинга.

Поток C1 водорода вводят, факультативно объединенным с водородом из другого источника, в контур 24 рециркуляции колошниковога газа установки DR водородом выше по потоку от нагревательного устройства 30.

Как и на фиг. 1, компрессор 34 расположен перед GSRP 1 для сжатия CO-содержащих потоков R1 и R2. Энергия может быть возвращена посредством дополнительной турбины 36 восстановления давления.

В расположенной ниже таблице показаны типичные составы газа для топливного колошниковога газа (поток R2) и технологического газа (поток R1).

% по объему	Топливный колошниковый газ (R2)	Технологический газ (R1)
CO	23,49	19,76
CO <sub>2</sub>	20,57	17,39
H <sub>2</sub>	46,54	39,21
H <sub>2</sub> O	2,91	15,54
N <sub>2</sub>	2,40	2,26
CH <sub>4</sub>	4,09	5,54
Температура (°C)	35	172
Давление (бар, избыточное)	0,9	2,66

Вариант осуществления № 4 - схема согласно фиг. 4. Этот последний вариант осуществления пред-

ставляет собой дополнительную возможность, которая может быть реализована в дополнение к предыдущим вариантам осуществления.

Сталеплавильный цех, включающий в себя установку MIDREX H2 и электродуговую печь (EAF) может сам производить часть водорода, требуемого процессом восстановления в установке 10 DR водородом согласно показанной на фиг. 4 конфигурации. В этом варианте осуществления разные источники тепла используют для выработки пара посредством средств рекуперации тепла/оборудования для выработки пара (например, бойлерного типа), расположенных в одном или более следующих местоположениях:

установку 60 рекуперации тепла/выработки пара на выходе колошникового газа из печи 16 перед входом в газоочиститель 26, вырабатывающую поток S7 пара,

установку 62 рекуперации тепла/выработки пара в месте установки EAF, вырабатывающую поток S9 пара,

установку 64 рекуперации тепла/выработки пара, объединенную с системой охлаждения HBI для выработки потока S8 пара (может быть также получен посредством тепла, отведенного от системы охлаждения CDRI).

Потоки S7, S8 и S9 (возможно с дополнительным потоком пара из сети промышленного предприятия) объединяют на смесительном узле 66, полученный поток S10 пара подают к питаемому паром электролизным средствам 3 для производства потока A1 водорода.

В вариант осуществления согласно фиг. 3 могут быть легко интегрированы дополнительные устройства (10, 11 и/или 12) рекуперации тепла и электролизные средства.

Преимущества.

Преимущества в отношении OPEX/CAPEX.

Обычная эксплуатация установок DR водородом имеет в настоящее время недостаток высоких OPEX (и CAPEX), связанных с производством водорода или его приобретения из источников, внешних относительно установки. Настоящее изобретения обеспечивает технически гибкое решение, поскольку оно может обеспечить преимущества как для настоящего времени, так и для будущего, где условия рынка будут изменяться.

Если в настоящее время питаемые паром электролизные средства не могут быть полностью рентабельными вследствие текущих цен на электроэнергию, можно минимизировать или исключить их вклад в процесс, делая упор на технологию сдвига фаз вода-газ, которая в настоящее время представляется как наиболее привлекательная для производства водорода с самой низкой пиковой стоимостью по сравнению с промышленным водородом, приобретаемым на рынке, и производством водорода, основанным на электролизе.

В ближайшем будущем цена на электроэнергию снизится. Решение с питаемым паром электролизом станет наиболее подходящим путем для производства водорода. Гибкость настоящих вариантов осуществления предоставляет возможность использования двух разных технологий в соответствии с наиболее подходящими условиями рынка.

Следовательно, упомянутые новаторские конфигурации установки могут уменьшить затраты, связанные с использованием водорода как в настоящее время, так и в будущем, принимая во внимание, что самовырабатываемый водород может удовлетворять требованиям процесса в изменяющихся пропорциях согласно характеристикам процесса и размеру установки.

Экологические преимущества.

Предлагаемые решения основаны на СО-содержащем газе и/или питаемом паром электролизе. В случае использования питаемого паром электролиза произведенный водород может быть объявлен свободным от СО<sub>2</sub> (при условии, что электроэнергия произведена соответствующим образом).

В случае использования СО-содержащего газа водород может быть объявлен по меньшей мере СО<sub>2</sub> нейтральным (поскольку не выбрасывается дополнительный СО<sub>2</sub>, а также не требуется дополнительное ископаемое топливо, то есть сравнение с паровым реформингом метана).

## ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ производства железа прямого восстановления (DRI), включающий в себя:  
 эксплуатацию установки прямого восстановления (DR) водородом, содержащей:  
 первую шахтную печь для восстановления железной руды в богатой водородом атмосфере,  
 первый контур технологического газа, содержащий нагревательное устройство и выполненный с возможностью отвода колошникового газа из первой шахтной печи, обработки колошникового газа перед его нагреванием в нагревательном устройстве, и возвращения в печь полученного восстановительного газа, содержащего по меньшей мере 85 % по объему водорода, а также выполненный с возможностью добавления потока подпиточного водорода к колошниковому газу выше по потоку от нагревательного устройства;  
 эксплуатацию системы, вырабатывающей СО-содержащий газ и/или отходящее тепло и/или пар и/или горячие газы, содержащей:

установку DR природным газом, эксплуатируемую на реформированном природном газе для производства DRI из железной руды, причем установка DR природным газом включает в себя вторую шахтную печь и второй контур технологического газа, причем второй контур технологического газа включает в себя средства нагрева и реформинга природного газа для выработки синтез-газа и выполнен с возможностью подачи полученного синтез-газа во вторую шахтную печь в качестве восстановительного газа,

причем, по меньшей мере, часть потока подпиточного водорода вырабатывают посредством по меньшей мере одного из:

электролизных средств, выполненных для производства водорода из полученного в упомянутой системе пара и/или выработанного упомянутой системе с использованием отходящего тепла пара и/или выделяемых в упомянутой системе горячих газов, и

реакторных средств сдвига газа, выполненных для превращения CO-содержащего газа, полученного в упомянутой системе, в водород и для удаления потока CO<sub>2</sub>.

2. Способ по п.1, включающий в себя рекуперацию тепла из установки DR природным газом для выработки пара и производства водорода в электролизных средствах.

3. Способ по п.2, причем средства рекуперации тепла размещают в упомянутом втором контуре технологического газа установки DR природным газом, прежде всего для приведения в контакт с колошниковым газом после выхода из шахтной печи, для рекуперации тепла из рециркулируемого колошникового газа и выработки пара, который подают к электролизным средствам.

4. Способ по п.2 или 3, причем средства рекуперации тепла размещают так, что обеспечена возможность рекуперации тепла от топочного газа из упомянутых средств нагрева и реформинга контура технологического газа установки DR природным газом, предпочтительно перед вытяжной трубой установки DR природным газом, для выработки пара.

5. Способ по п.2, 3 или 4, причем средства рекуперации тепла размещают для рекуперации тепла от горячего DRI, произведенного установкой DR природным газом, для выработки пара.

6. Способ по одному из предшествующих пунктов, причем упомянутая система включает в себя электродуговую печь, и средства рекуперации тепла размещены так, что обеспечена возможность рекуперации отходящего тепла и/или тепла горячих газов, выделяемых электродуговой печью для выработки пара, и возможно от расположенного ниже по потоку оборудования.

7. Способ по одному из пп.1-6, включающий в себя извлечение CO-содержащего газа из установки DR природным газом, и подачу извлеченного CO-содержащего газа к реакторным средствам сдвига газа, предпочтительно, первый поток CO-содержащего газа извлекают из контура технологического газа ниже по потоку от компрессорных средств и/или второй поток CO-содержащего газа извлекают после установки пылеулавливания в контуре технологического газа.

8. Способ по одному из предшествующих пунктов, включающий в себя рекуперацию тепла посредством средств рекуперации тепла, расположенных в одном или более местоположений в установке DR водородом, и подачу выработанного пара к электролизным средствам.

9. Способ по п.8, причем средства рекуперации тепла размещают в упомянутом втором контуре технологического газа установки DR водородом, предпочтительно для приведения в контакт с колошниковым газом после выхода из упомянутой второй шахтной печи, для рекуперации тепла из рециркулируемого колошникового газа и выработки пара, подаваемого к электролизным средствам.

10. Способ по п.8 или 9, причем средства рекуперации тепла размещают для рекуперации тепла от горячего DRI, произведенного установкой DR водородом, для выработки пара, подаваемого к электролизным средствам.

11. Способ по одному из предшествующих пунктов, причем упомянутая система включает в себя одну или более агломерационных установок, батарею коксовых печей, электродуговую печь, доменную печь, погружную дуговую печь (SAF), установки непрерывного литья, прокатные станы, основной кислородный конвертер и т.п.

12. Способ по одному из предшествующих пунктов, причем первый контур технологического газа включает в себя газоочистительные средства и компрессорные средства выше по потоку от нагревательного устройства, причем добавление потока водорода выполняют между компрессорными средствами и нагревательным устройством.

13. Способ по пп.1-12, причем поток водорода, добавляемого к первому контуру технологического газа, содержит от 90 до 100 % по объему H<sub>2</sub>, и факультативно водород из другого источника подается к установке DR водородом.

14. Установка для производства железа прямого восстановления, содержащая:

систему, включающую в себя по меньшей мере одно средство, вырабатывающее CO-содержащий газ, отходящее тепло и/или пар и/или горячие газы;

установку прямого восстановления (DR) природным газом, эксплуатируемую на реформированном природном газе для производства DRI из железной руды, причем установка DR природным газом включает в себя вторую шахтную печь и второй контур технологического газа, причем второй контур технологического газа включает в себя средства нагрева и реформинга природного газа для выработки синтез-газа и выполнен с возможностью подачи полученного синтез-газа во вторую шахтную печь в качестве

восстановительного газа,

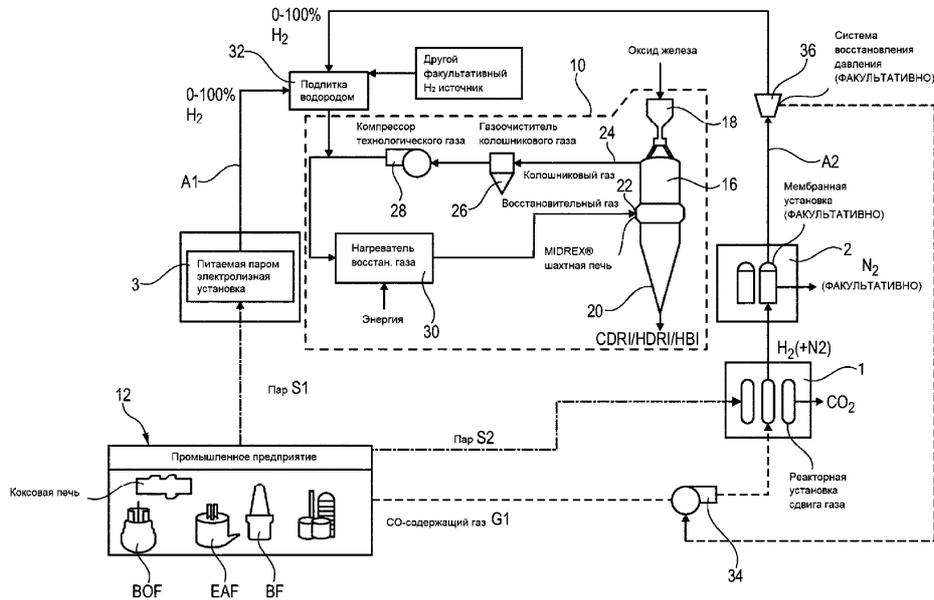
установку DR водородом, включающую в себя первую шахтную печь для восстановления железной руды в водородной восстановительной атмосфере, и первый контур технологического газа, содержащий нагревательное устройство и выполненный с возможностью отвода колошникового газа из первой шахтной печи, обработки колошникового газа перед его нагреванием в нагревательном устройстве, и возвращения в печь полученного восстановительного газа, содержащего по меньшей мере 80 % по объему водорода, а также выполненный с возможностью добавления потока подпиточного водорода к колошниковому газу выше по потоку от нагревательного устройства;

средства производства водорода, включающие в себя по меньшей мере одно из:

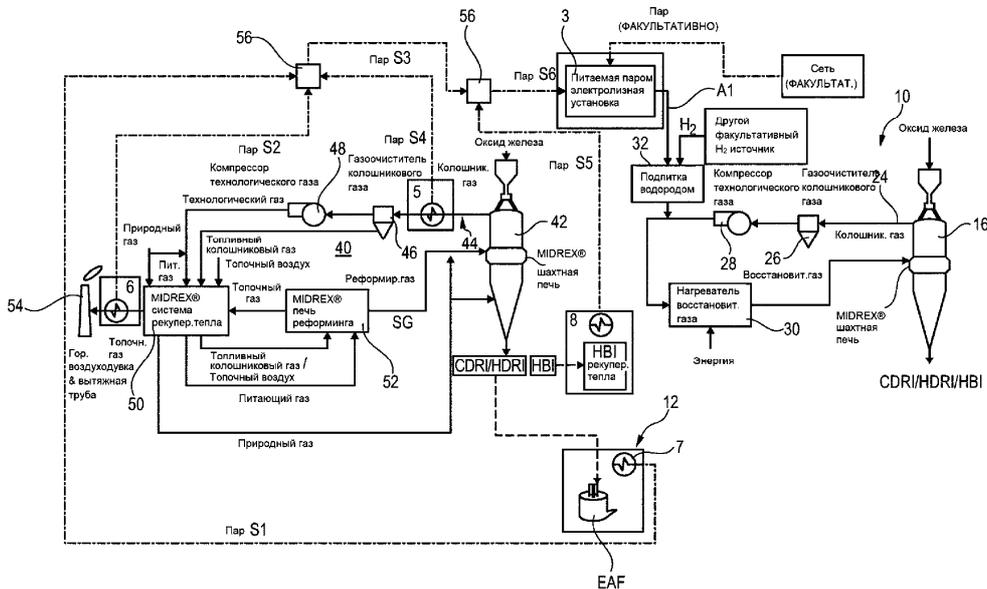
электролизных средств, выполненных для производства водорода из полученного в упомянутой системе пара и/или выработанного в упомянутой системе с использованием отходящего тепла пара и/или выделяемых в упомянутой системе горячих газов, и

реакторных средств сдвига газа, выполненных для превращения СО-содержащего газа, полученного в упомянутой системе, в водород и для удаления потока CO<sub>2</sub>,

причем упомянутая установка для производства железа прямого восстановления выполнена с возможностью, по меньшей мере, частичной подачи потока(-ов) водорода, произведенного(-ых) посредством средств производства водорода, к установке DR водородом для добавления в упомянутый первый контур технологического газа.



Фиг. 1



Фиг. 2

