

(19)



Евразийское
патентное
ведомство

(21) 202491020 (13) A1

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ

(43) Дата публикации заявки
2024.06.11(22) Дата подачи заявки
2022.10.20(51) Int. Cl. C10K 3/06 (2006.01)
C10B 21/08 (2006.01)
C10K 3/04 (2006.01)
C10K 1/00 (2006.01)
B01D 53/14 (2006.01)
C10B 21/10 (2006.01)

(54) СПОСОБ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОКСОГАЗОВОГО ЗАВОДА

(31) LU500783

(32) 2021.10.25

(33) LU

(86) PCT/EP2022/079312

(87) WO 2023/072742 2023.05.04

(71) Заявитель:
ПАУЛЬ ВЮРТ С.А. (LU)

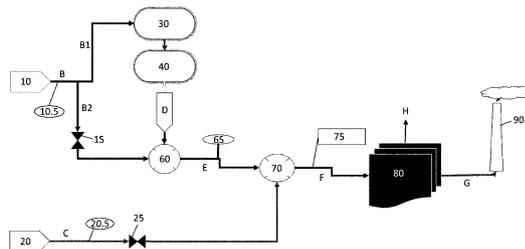
(72) Изобретатель:

Феррарис Алессандро, Кальканьо
Риккардо (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) Способ эксплуатации коксогазового завода, включающий в себя следующие шаги: а) обеспечение потока (В) доменного газа, включающего в себя монооксид углерода CO , диоксид углерода CO_2 и водород H_2 , и потока (С) коксового газа, включающего в себя водород H_2 , монооксид углерода CO и метан CH_4 , б) обработку части (В1) потока (В) доменного газа путем преобразования монооксида углерода в диоксид углерода в блоке (30) конвертера CO для получения обработанного потока доменного газа, в) воздействие на обработанный поток доменного газа, полученный на шаге б), для удаления диоксида углерода в блоке (40) удаления CO_2 для получения первичного потока (D) обедненного CO_2 доменного газа, г) смешивание первичного потока (D) обедненного CO_2 доменного газа, полученного на шаге в), с долей (В2) потока (В) доменного газа в первом смешительном блоке (60) для получения вторичного потока (E) обедненного CO_2 доменного газа, д) смешивание вторичного потока (E) обедненного CO_2 доменного газа, полученного на шаге г), с долей потока (С) коксового газа во втором смешительном блоке (70) для получения третичного потока (F) обедненного CO_2 газа, е) подачу третичного потока (F) обедненного CO_2 газа в систему обогрева с нижним подводом коксовой печи (80) коксогазового завода для преобразования угля в кокс с получением коксового газа (H) и отходящего газа (G), причем свойства вторичного потока (E) обедненного CO_2 доменного газа определяют первым анализатором (65) ниже по потоку от первого смешительного блока (60), а свойства третичного потока (F) обедненного CO_2 газа определяют вторым анализатором (75) ниже по потоку от второго смешительного блока (70), причем долю (В2) потока (В) доменного газа и долю потока (С) коксового газа регулируют на основе свойств, определенных первым (65) и вторым (75) анализаторами, для регулировки по меньшей мере одного из содержания CO_2 , содержания CO , содержания H_2 , индекса Воббе, стехиометрической потребности в воздухе для горения и низшей теплотворной способности в третичном потоке (F) обедненного CO_2 газа, тем самым регулируя работу системы обогрева с нижним подводом.



A1

202491020

202491020

A1

СПОСОБ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОКСОГАЗОВОГО ЗАВОДА

5 Область техники

Настоящее изобретение, в общем, относится к способу эксплуатации коксогазового завода, а также к соответствующему коксогазовому заводу.

Уровень техники

10 Как хорошо известно, современные коксохимические заводы или коксовые заводы построены в виде батарей, которые могут содержать от нескольких десятков до более 100 коксовых камер. Из-за физических размеров коксовых камер (узких, длинных и высоких) их иногда называют щелевыми печами. Печи спроектированы и эксплуатируются таким образом, чтобы обеспечить сбор летучих продуктов, выделяющихся из угля в процессе коксования. Процесс
15 коксования обычно осуществляется циклически, повторяя следующие основные шаги: загрузка, коксование и выталкивание (опорожнение).

Тепло, необходимое для эксплуатации процесса коксования, обычно обеспечивается за счет сжигания горючих газов. Хотя эти газы могут быть любой подходящей природы, по экономическим соображениям может
20 использоваться доменный газ, если он имеется в наличии на коксогазовом заводе.

Более того, поскольку работа доменной печи сложна и постоянно требует учета множества параметров и изменения входных переменных для получения чугуна хорошего качества и выхода, состав получаемого доменного газа более
25 или менее сильно колеблется во времени.

Таким образом, работа системы отопления/системы обогрева с нижним подводом коксовых печей с доменным газом далека от идеала не только из-за его низкой теплотворной способности, но и из-за сильно колеблющегося
30 состава.

Техническая проблема

Задачей настоящего изобретения является создание способа эксплуатации коксогазового завода, который может использовать обогрев с нижним подводом доменным газом, но при этом обеспечивать лучший и более надежный нагрев в системе обогрева с нижним подводом за счет обеспечения значительно

улучшенного и более гибкого управления газа обогрева с нижним подводом, направленного, прежде всего, на поддержание наилучших параметров горения и эффективности работы коксовых печей в любое время. Предпочтительно, чтобы способ был применим не только к новым, но и к существующим коксовым заводам.

Общее описание изобретения

Для достижения этой цели настоящее изобретение предлагает, в первом аспекте, способ эксплуатации коксогазового завода, причем способ включает в себя шаги:

а) обеспечение потока доменного газа, включающего в себя монооксид углерода (CO), диоксид углерода (CO₂) и водород (H₂), и потока коксового газа, включающего в себя водород, монооксид углерода и метан (CH₄) (и другие углеводороды),

б) обработка (по крайней мере) части потока доменного газа путем преобразования монооксида углерода в диоксид углерода в блоке конвертера CO для получения обработанного потока доменного газа,

в) воздействие на обработанный поток доменного газа, полученный на шаге б), для удаления диоксида углерода в блоке удаления CO₂ с получением первичного потока обедненного CO₂ доменного газа,

г) смешивание первичного потока обедненного CO₂ доменного газа, полученного на шаге в), с частью потока доменного газа в первом смешительном блоке для получения вторичного потока обедненного CO₂ доменного газа,

д) смешивание вторичного потока обедненного CO₂ доменного газа, полученного на шаге г), с долей потока коксового газа во втором смешительном блоке для получения третичного потока обедненного CO₂ газа,

е) подача третичного потока обедненного CO₂ газа в систему обогрева с нижним подводом коксовой печи коксогазового завода для преобразования угля в кокс, в результате чего образуются коксовый газ и отходящий газ.

Согласно изобретению одно или несколько свойств вторичного потока обедненного CO₂ доменного газа определяются первым анализатором, расположенным ниже по потоку от первого смешительного блока, а одно или несколько свойств третичного потока обедненного CO₂ газа определяются вторым анализатором, расположенным ниже по потоку от второго смешительного блока. Доля потока доменного газа и доля потока коксового газа

регулируются на основе свойств, определенных первым и вторым анализаторами, для регулировки по меньшей мере одного из одного или более свойств, выбранных из: содержания CO_2 (или концентрации CO_2), содержания CO (или концентрации CO), содержания H_2 (или концентрации H_2), индекса Воббе, стехиометрической потребности в воздухе для горения/кислороде и 5 низшей теплотворной способности в потоке третичного обедненного CO_2 газа, тем самым регулируя работу системы обогрева с нижним подводом.

Во втором аспекте изобретение предлагает коксогазовый завод, предпочтительно выполненный для осуществления описанного в настоящем документе способа эксплуатации коксогазового завода, причем коксогазовый 10 завод включает в себя:

а) источник доменного газа, прежде всего сеть доменного газа, выполненный для обеспечения потока доменного газа, включающего в себя монооксид углерода CO , диоксид углерода CO_2 и водород H_2 , и источник коксового газа, 15 прежде всего сеть коксового газа или коксовый газ, производимый на самом коксогазовом заводе, выполненный для обеспечения потока коксового газа, включающего в себя водород H_2 , монооксид углерода CO и метан CH_4 (и другие углеводороды),

б) блок конвертера CO , гидродинамически соединенный с источником доменного газа и выполненный для обработки (по меньшей мере) части потока доменного газа путем преобразования монооксида углерода в диоксид углерода для получения потока обработанного доменного газа, 20

в) блок удаления CO_2 , гидродинамически соединенный с блоком конвертера CO и выполненный для удаления диоксида углерода из обработанного потока доменного газа с получением первичного потока обедненного CO_2 доменного 25 газа,

г) первый смесительный блок, гидродинамически соединенный с блоком удаления CO_2 и управляемо гидродинамически соединенный с источником доменного газа, первый смесительный блок выполнен для смешивания 30 первичного потока обедненного CO_2 доменного газа из блока удаления CO_2 с долей потока доменного газа для получения вторичного потока обедненного CO_2 доменного газа, причем управляемое гидродинамическое соединение с источником доменного газа включает в себя управляемый регулятор перепускного потока доменного газа, например первый управляемый клапан,

д) второй смесительный блок, гидродинамически соединенный с первым смесительным блоком и управляемо гидродинамически соединенный с источником коксового газа, причем второй смесительный блок выполнен для смешивания вторичного потока обедненного CO_2 доменного газа из первого смесительного блока с частью потока коксового газа для получения третичного потока обедненного CO_2 газа, причем управляемое гидродинамическое соединение с источником коксового газа включает в себя управляемый регулятор потока коксового газа, например второй управляемый клапан, и

е) коксовая печь коксогазового завода, включающая в себя систему обогрева с нижним подводом, гидродинамически соединенную со вторым смесительным блоком и выполненную для сжигания третичного потока обедненного CO_2 газа для преобразования угля в кокс с получением коксового газа и отходящего газа.

Коксогазовый завод согласно изобретению также включает в себя:

- первый анализатор ниже по потоку от первого смесительного блока (и выше по потоку от второго смесительного блока), выполненный для определения одного или более свойств вторичного потока обедненного CO_2 доменного газа,

- второй анализатор, расположенный ниже по потоку от второго смесительного блока (и выше по потоку от системы обогрева с нижним подводом), выполненный для определения одного или более свойств третичного потока обедненного CO_2 газа, и

- блок управления, выполненный для управления работой системы обогрева с нижним подводом путем определения доли потока доменного газа и доли потока коксового газа на основе свойств, определенных первым и вторым анализаторами, и управления управляемым регулятором перепускного потока доменного газа и управляемым регулятором потока коксового газа таким образом, чтобы регулировать по меньшей мере одно из указанных одного или более свойств, выбранных из: содержания CO_2 (или концентрации CO_2), содержания CO (или концентрации CO), содержания H_2 (или концентрации H_2), индекса Воббе, стехиометрической потребности в воздухе/кислороде для горения и низшей теплотворной способности в третичном потоке обедненного CO_2 газа.

Доменный газ (BFG), также называемый колошниковым газом, является побочным продуктом работы доменной печи, который образуется при

восстановлении железной руды с помощью кокса до металлического железа. Доменный газ состоит в основном из азота, диоксида и монооксида углерода и некоторого количества водорода. В обычных процессах доменный газ обычно содержит около 45-55 % N_2 , около 15-25 % CO , около 15-25 % CO_2 и около 1-10 % H_2 . В зависимости от работы доменной печи или процесса объемная доля монооксида углерода может превышать 25 %, а объемная доля водорода может превышать 10 %, достигая 15 % H_2 , например в доменной печи с вдуванием природного газа.

Хотя доменный газ обычно имеет относительно низкую теплотворную способность и не является идеальным газом, его можно использовать в системе обогрева с нижним подводом коксовой печи (батареи). Основным недостатком, помимо его низкой теплотворной способности, является то, что он представляет собой неизбежный остаток или побочный продукт металлургического процесса, который эксплуатируется для наилучшего производства чугуна, независимо от состава этого остатка. Следовательно, этот состав может сильно меняться во времени в зависимости от фактических условий работы доменной печи. Таким образом, для эксплуатации коксовой печи не только требуется большое количество доменного газа, но и, что еще более важно, очень сложно обеспечить стабильную и контролируемую работу.

Хотя известно, что проблему низкой теплотворной способности доменного газа можно решить добавлением определенной доли коксового газа, то есть газа, образующегося в процессе коксования, поскольку этот газ имеет более высокую теплотворную способность, это не позволяет существенно снизить изменчивость состава доменного газа и, следовательно, некоторых его свойств, имеющих значение для использования в системе обогрева с нижним подводом коксовой печи. Напротив, коксовый газ сам по себе является побочным продуктом, состав которого может отдельно меняться с течением времени, тем самым еще больше усугубляя нестабильную работу системы обогрева с нижним подводом.

Изобретатели пришли к выводу, что даже комбинированное и контролируемое использование доменного и коксового газа не может надежно обеспечить получение газа, свойства которого являются одновременно подходящими и достаточно постоянными для оптимальной работы системы обогрева с нижним подводом. Однако изобретатели обнаружили, что обе проблемы можно значительно уменьшить, удалив значительную долю CO_2 из

части доменного газа, уменьшив общую пропускную способность, но оставив большую долю теплотворных газов в результирующем потоке. Более того, изобретатели определили, что, действуя таким образом, они смогут получить реальную и дополнительную степень свободы в контроле свойств газа обогрева с

5 нижним подводом, что позволит независимо и, следовательно, более надежно контролировать различные свойства получаемого газа. Действительно, изобретатели не только признали, что основным фактором отклонений состава доменного газа является различное содержание в нем CO_2 , но и то, что его (по крайней мере, частичное) удаление позволит получить газ с существенно иными

10 и желательными свойствами. Действительно, при обеднении доменного газа предпочтительно (по существу) всем его CO_2 можно не только повысить теплотворную способность получаемого газа, но и улучшить важные свойства получаемого обедненного CO_2 доменного газа по сравнению с исходным доменным газом, например, повысить его индекс Воббе. Индекс Воббе является

15 важным свойством горючего газа, так как горелки, например, используемые в системе обогрева с нижним подводом, обычно настроены на наилучшую работу, когда это свойство находится в разумных пределах.

Тот факт, что в настоящее время имеются два газа с очень разными свойствами, но происходящие из одного и того же недорогого доменного газа,

20 обеспечивает большой и гибкий спектр комбинаций, с помощью которых могут быть достигнуты лучшие параметры горения и эффективность работы коксовой печи. И последнее, но не менее важное преимущество настоящего изобретения заключается в том, что эти преимущества могут быть получены одновременно со значительным снижением выбросов CO_2 в выходящий трубе коксовой печи.

25 Кроме того, поскольку доменный газ также содержит в значительной степени изменяющееся количество CO , было бы выгодно также вычитать этот газ из колошникового газа доменной печи. Однако, в отличие от CO_2 , CO , с одной стороны, является более проблематичным, поскольку он высокотоксичен, и его удаление потребует значительно более строгих мер безопасности. Таким

30 образом, изобретение предусматривает преобразование монооксида углерода в диоксид углерода любым подходящим способом. Затем исходный CO_2 и вновь образованный CO_2 могут быть удалены за одну операцию известными способами, как более подробно описано ниже. С другой стороны, в отличие от CO_2 , CO все еще обладает определенной теплотворной способностью, которая

может быть с пользой использована в системе обогрева с нижним подводом. Как будет подробнее описано ниже, конверсия CO в CO₂, предпочтительно используемая в выгодных вариантах осуществления, представляет собой так называемую реакцию сдвига водяного газа. Как будет понятно специалисту, это еще больше снижает выбросы CO₂ в выходящий трубе коксовой печи.

Следовательно, настоящее изобретение позволяет повысить гибкость и надежность работы коксовой печи за счет лучшего контроля отклонений теплотворной способности и других свойств, таких как индекс Воббе, путем обеспечения вторичного обедненного CO₂ доменного газа, который получают путем добавления соответствующего регулируемого количества исходного, необработанного доменного газа через определение подходящих свойств газа ниже по потоку от первого смесительного блока и перепуска соответствующего количества необработанного доменного газа в первый смесительный блок. Предпочтительно, соответствующие свойства доменного газа могут быть либо уже доступны, например, посредством мониторинга в сети доменного газа, либо могут быть определены отдельно с помощью третьего анализатора и отправлены в блок управления для еще более точного снижения отклонений свойств потока третичного CO₂-обезвоженного газа.

Кроме того, по меньшей мере теплотворная способность газа, подаваемого в систему обогрева с нижним подводом, повышается за счет предвидения введения доли коксового газа в объединенный поток доменного газа, по меньшей мере, частично обедненного CO₂ (то есть, вторичного потока обедненного CO₂ доменного газа). Действительно, коксовый газ обычно образуется при нагревании угля до 1100 °C в отсутствие воздуха/кислорода. Типичный состав коксового газа включает в себя, например, водород (H₂ - 55 %), метан (CH₄ - 24 %), монооксид углерода (CO - 8 %), другие углеводороды (C_nH_m - 1,5-3 %). Предпочтительно, соответствующие свойства коксового газа могут быть либо уже доступны, например, через мониторинг в сети коксового газа, либо могут быть определены отдельно с помощью четвертого анализатора и переданы в блок управления для еще более точного снижения отклонений свойств третичного потока обедненного CO₂ газа.

Общий мониторинг и управление способом осуществляются путем непрерывного определения или мониторинга одного или более свойств вторичного потока обедненного CO₂ доменного газа (то есть, обедненного CO₂

доменного газа смешанного при необходимости с необработанным доменным газом), и свойств третичного потока обедненного CO₂ газа (то есть, третичного обедненного CO₂ газа), то есть обедненного CO₂ доменного газа, смешанного при необходимости с необработанным доменным газом и коксовым газом), а также путем управления или командования регуляторами потока, например, управляемыми клапанами, расположенными в байпасе доменного газа и в подаче коксового газа. Разумеется, можно предусмотреть дополнительные точки мониторинга и/или точки управления, если это будет сочтено необходимым или полезным.

Преимущественно, доля потока доменного газа и доля потока коксового газа регулируются на основе свойств, определенных первым и вторым анализаторами, для регулировки по меньшей мере одного из индекса Воббе и низшей теплотворной способности в третичном потоке обедненного CO₂ газа.

Индекс Воббе, обычно обозначаемый IW, определяется следующим образом (в МДж/Нм³):

$$I_W = \frac{V_C}{\sqrt{G_S}},$$

если V_C - более высокая теплотворная способность (или более высокая теплотворность), G_S - удельный вес и

$$G_S = \frac{\rho_{STP}}{\rho_{air,STP}} = \frac{M}{M_{air}},$$

где ρ_{STP} - плотность газа при стандартных условиях (0 °С, 101,325 кПа), ρ_{air,STP} - плотность воздуха при стандартных условиях, M - молярная масса газа, а

M_{air} - молярная масса воздуха, которая составляет около 28,96 кг/кмоль.

Низшая теплотворная способность (LHV, чистая теплотворная способность, NCV, или низшая теплотворная способность, LCV) - это мера доступной тепловой энергии, получаемой при сгорании топлива, измеряемая как единица энергии на единицу массы или объема вещества, например, в кДж/Нм³, при

условии, что водный компонент процесса сгорания остается в парообразном состоянии в конце сгорания. Следовательно, низшая теплотворная способность обычно определяется как количество тепла, выделяемого при сгорании, когда продукты охлаждаются до 150 °С, что означает, что скрытая теплота
5 парообразования воды (и, возможно, других продуктов реакции) не восстанавливается.

Вкратце, изобретение позволяет значительно улучшить и надежно регулировать работу системы обогрева с нижним подводом коксового газа, позволяя гибко регулировать в значительно больших диапазонах важные
10 свойства газа обогрева с нижним подводом, такие как индекс Воббе, путем подачи и регулируемого сочетания двух различных газов из одного доменного газа и дополнительно регулировать другие свойства газа обогрева с нижним подводом, такие как его низшая теплотворная способность, путем добавления коксового газа по мере необходимости или желания. Более того, эти
15 преимущества достигаются наряду со значительным снижением углеродного следа всего процесса коксования.

Предпочтительно, доля потока доменного газа и доля потока коксового газа специально или главным образом регулируются для уменьшения отклонений в работе системы обогрева с нижним подводом.

В преимущественных вариантах осуществления изобретения отклонения
20 одного или более свойств, выбранных из содержания CO_2 , содержания CO , содержания H_2 , стехиометрической потребности в воздухе для горения/кислороде, индекса Воббе и низшей теплотворной способности, третичного потока, обедненного CO_2 , снижаются по меньшей мере на 5 %, предпочтительно по меньшей мере на 10 %, более предпочтительно по меньшей мере на 20 % по сравнению с отклонениями тех же самых одного или более свойств доменного газа из источника или сети доменного газа.

Альтернативно или дополнительно, доля потока доменного газа и доля
30 потока коксового газа специально или главным образом регулируется для поддержания индекса Воббе вблизи целевого значения и/или для повышения низшей теплотворной способности доменного газа.

В преимущественных вариантах осуществления изобретения индекс Воббе третичного обедненного CO_2 потока регулируется таким образом, чтобы он находился в диапазоне +/- 20 %, предпочтительно +/- 15 %, более

предпочтительно +/- 10 %, от заданного/целевого значения индекса Воббе (специфичного для системы обогрева с нижним подводом).

В дальнейших преимущественных вариантах осуществления изобретения низшая теплотворная способность третичного потока обедненного CO_2 газа повышается по меньшей мере на 10 %, предпочтительно по меньшей мере на 20 %, более предпочтительно по меньшей мере на 30 %, по сравнению с низшей теплотворной способностью доменного газа из источника или сети доменного газа. Таким образом, обычно низшая теплотворная способность третичного потока обедненного CO_2 регулируется в диапазоне от 3700 до 5300 кДж/Нм³, предпочтительно в диапазоне от 4100 до 5000 кДж/Нм³.

Альтернативно или дополнительно, доля потока доменного газа и доля потока коксового газа специально или главным образом регулируется для снижения содержания CO_2 в отходящем газе, то есть для снижения углеродного следа процесса коксования.

В еще более предпочтительных вариантах осуществления изобретения выбросы CO_2 в отходящий газ коксовой печи снижаются по меньшей мере на 30 %, предпочтительно по меньшей мере на 60 %, более предпочтительно по меньшей мере на 90 % по сравнению с выбросами CO_2 в тот же отходящий газ при работе без удаления CO_2 (то есть, только доменный газ из источника доменного газа через байпас и коксовый газ), причем все остальные условия остаются неизменными.

Как уже кратко упоминалось выше, в предпочтительных вариантах осуществления способ включает в себя, на шаге б), обработку (по меньшей мере) части потока доменного газа в блоке конвертера CO с помощью реакции сдвига водяного газа, в которой CO преобразуется в присутствии воды (пара) в CO_2 и водород. Таким образом, на коксогазовом заводе блок конвертера CO предпочтительно включает в себя реактор конверсии водяного газа. В таких случаях образование дополнительного водорода увеличивает теплотворную способность получаемого газа, позволяя при этом удалять CO , который теперь преобразуется в CO_2 .

Удаление диоксида углерода в блоке удаления CO_2 может быть осуществлено любым известным и подходящим способом, например, одним или несколькими шагами химической абсорбции и/или физической адсорбции. Предпочтительно, шаг удаления CO_2 включает в себя один или несколько шагов

физической адсорбции и/или химической адсорбции, таких как адсорбция при переменном давлении (PSA), вакуумная адсорбция при переменном давлении (VPSA), улавливание промывочной жидкостью (жидкостями) и т.д.

5 Блок удаления CO₂ может, например, состоять из абсорбера и стриппера. В абсорбере промывочная жидкость (например, водный раствор амина) поглощает CO₂ (и, возможно, другие кислые газы, такие как H₂S) из колошникового газа доменной печи. Промывочная жидкость, обогащенная поглощенным CO₂, может быть направлена в стриппер, где она нагревается. Таким образом, промывочная жидкость высвобождает поглощенный CO₂, и промывочная жидкость может
10 быть повторно использована в абсорбере. Высвобожденный CO₂ репродуцируется, хранится и может быть использован для других целей.

Промывочная жидкость может быть любой промывочной жидкостью, подходящей для удаления CO₂ из газа. Например, промывка может состоять из раствора моноэтаноламина (MEA), диэтаноламина (DEA), метилдиэтаноламина
15 (MDEA), диизопропиламина (DIPA) и/или дигликолямина (DGA).

Адсорбция при переменном давлении (PSA) - это способ, используемый для отделения некоторых видов газа от смеси подаваемых под давлением газов в соответствии с молекулярными характеристиками вида и его сродством к материалу адсорбента. Она работает при температуре, близкой к ambientной.
20 Селективные адсорбирующие материалы (например, цеолиты, активированный уголь и т. д.) используются в качестве улавливающего материала, преимущественно адсорбирующего целевой вид газа при высоком давлении. Затем процесс переходит к низкому давлению для десорбции адсорбированного газа. Вакуумная адсорбция при переменном давлении (VPSA) отделяет газы от газообразной смеси при давлении, близком к атмосферному, процесс затем
25 переходит в вакуум для регенерации адсорбирующего материала.

В некоторых вариантах осуществления реакция сдвига водяного газа (шаг б)) может быть объединена с адсорбцией при переменном давлении (шаг в)) в так называемом реакторе сдвига водяного газа с усиленной сорбцией (SEWGS),
30 например, в многослойной установке адсорбции при переменном давлении (PSA), в которой емкости заполнены катализатором сдвига водяного газа и адсорбирующим материалом CO₂. Реакторы SEWGS сочетают катализируемую реакцию сдвига водяного газа и разделение CO₂ на основе твердого сорбента,

например, К-промотированного гидротальцитового адсорбента, что позволяет осуществлять конверсию СО и улавливание СО₂ в рамках одной установки.

В контексте изобретения шаги б) и/или в) могут быть не только объединены в одну ступень или устройство, каждый шаг может альтернативно включать более одной обработки, последовательной или параллельной, одного и того же типа или другого типа, если это необходимо или желательно.

В еще более выгодных вариантах осуществления изобретения стехиометрическая потребность в воздухе для сжигания или стехиометрическая потребность в кислороде для сжигания (то есть, количество воздуха или кислорода, необходимое для достижения максимальной эффективности сжигания) определяется, по меньшей мере, вторым анализатором для обеспечения возможности управления количеством кислорода или воздуха, подаваемого в систему обогрева с нижним подводом.

В контексте настоящего изобретения термины "обедненный СО₂" или "обедненный СО₂" в контексте доменного газа используются для обозначения такого газа, концентрация СО₂ которого была снижена (или действие по снижению концентрации) по сравнению с исходным доменным газом, предоставляемым источником доменного газа, таким как сеть доменного газа или доменная печь непосредственно из колошника доменной печи. После удаления СО₂ доменный газ может по-прежнему содержать остаточную концентрацию СО₂. Соответственно, "обедненный СО₂ доменный газ", в общем, означает "доменный газ с низкой концентрацией СО₂". Прежде всего, удаление диоксида углерода в блоке удаления СО₂ происходит таким образом, что содержание или концентрация СО₂ в первичном потоке обедненного СО₂ доменного газа составляет не более 10 % по объему, обычно не более 7,5 % по объему, предпочтительно не более 5 % по объему, более предпочтительно не более 2,5 % по объему.

Таким образом, в еще одном аспекте изобретение предлагает использование способа эксплуатации коксогазового завода, как описано в настоящем документе, или использование такого коксогазового завода для снижения отклонений в работе системы обогрева с нижним подводом, обогреваемой доменным газом.

Альтернативно или дополнительно, изобретение предлагает использование способа эксплуатации коксогазового завода, как описано в настоящем

документе, или использование такого коксогазового завода для поддержания индекса Воббе вблизи заданного или целевого значения и для повышения низшей теплотворной способности доменного газа.

5 Альтернативно или дополнительно, изобретение предлагает использование способа эксплуатации коксогазового завода, как описано в настоящем документе, или использование такого коксогазового завода для снижения содержания (невозобновляемого) CO_2 в отходящем газе, то есть для снижения CO_2 -отпечатка отходящего газа или всего процесса коксования.

10 Способ и коксогазовый завод в соответствии с одним или несколькими описанными здесь вариантами осуществления реализуют по меньшей мере некоторые из следующих результатов и преимуществ:

Сокращение выбросов CO_2 от 30 % до 90 % и выше в дымовой трубе коксогазового завода.

15 Конечный выброс CO_2 можно регулировать в соответствии с тепловым режимом новой или существующей коксовой батареи, поддерживая наилучшие условия сгорания в отопительных дымоходах, регулируя низшую теплотворную способность входного газа в коксовый газ и/или индекс Воббе, посредством байпаса и регулирования, как описано в настоящем документе.

20 Специальный блок управления/система автоматизации (интегрированный в существующую автоматику или как отдельный модуль) может управлять уставками или целевыми значениями, чтобы соответствовать наилучшим условиям сгорания и/или минимальным выбросам CO_2 .

25 Стандартных приборов в большинстве случаев достаточно для анализа и предоставления данных, необходимых для расчета в режиме онлайн характеристик потоков, необходимых для оценки оптимального заданного значения контуров регулирования.

30 Специальный модуль автоматизации может быть предусмотрен для непрерывной регистрации теплового потребления газа и регулировки заданных значений клапанов регулятора для поддержания необходимого теплового потребления в батарее, регулируя низшую теплотворную способность коксового газа по отношению к входному газу и индекс Воббе в соответствии с результатами сжигания. Расход потока обедненного CO_2 доменного газа можно регулировать для получения минимальных выбросов CO_2 в трубу и

эффективного сжигания, регулируя индекс Воббе и минимальную низшую теплотворную способность в системе регенеративного отопления.

Поток обедненного CO_2 доменного газа может использоваться как альтернатива традиционному нагреву только доменным газом, имея в любом случае более высокую низшую теплотворную способность и скорректированный индекс Воббе по сравнению с доменом и производя меньшие выбросы CO_2 , чем в случае чистого доменного газа и смешанного газа.

10 Более того, в случае временной недоступности блока удаления CO_2 , коксовую батарею не нужно останавливать, она может подаваться через байпас доменного газа, вместе с обогащением коксового газа.

Способ изобретения может быть реализован как на новом коксогазовом заводе, так и на существующих заводах, тем самым предлагая экономически эффективный способ модернизации существующих заводов и обеспечивая новую гибкость в работе, лучший контроль и эффективность системы обогрева с нижним подводом и/или снижение выбросов CO_2 .

Способ эксплуатации коксогазового завода, раскрытый в настоящем документе, позволяет гибко управлять различными потоками с помощью алгоритмов, направленных на оптимизацию по меньшей мере одного из выбросов CO_2 (путем предпочтения первичного потока обедненного CO_2 доменного газа в первом смесительном блоке), параметров горения коксовой печи (путем стабилизации индекса Воббе или регулировки низшей теплотворной способности в третичном потоке, обедненном CO_2) и/или стабилизации теплового ввода (путем уменьшения отклонений одного или более свойств, таких как индекс Воббе и/или низшая теплотворная способность, в третичном потоке обедненном CO_2 газа).

Наконец, особым преимуществом изобретения является то, что оно может быть реализовано как на новом, так и на существующем коксогазовом заводе.

Краткое описание чертежей

Теперь будет описан предпочтительный вариант осуществления изобретения, в качестве примера, со ссылкой на сопроводительный чертеж, на котором:

Фиг. 1 представляет собой схематический вид одного из вариантов осуществления (части) коксогазового завода.

Другие подробности и преимущества настоящего изобретения станут очевидными из следующего подробного описания нескольких неограничивающих вариантов осуществления со ссылкой на прилагаемый чертеж.

5 Описание предпочтительных вариантов осуществления

Вариант осуществления способа эксплуатации коксогазового завода или вариант осуществления самого такого коксогазового завода схематично представлен на фиг. 1.

10 В коксовую печь или коксовую батарею 80 подается поток питания коксовой печи, представляющий собой так называемый третичный поток F обедненного CO_2 газа, который производится в основном из потока В доменного газа из источника доменного газа, такого как сеть 10 доменного газа, и некоторой доли потока С коксового газа (COG) из источника коксового газа, такого как сеть коксового газа, или с использованием потока Н коксового газа
15 непосредственно из коксовой печи.

Как видно на фиг. 1, часть В1, то есть первая часть, потока В доменного газа сначала подается в блок 30 конвертера СО для преобразования, по меньшей мере, части, предпочтительно по существу всей, например, > 90 мол. %, более предпочтительно > 95 мол. %, более предпочтительно > 99 мол. %, монооксида углерода СО, содержащегося в доменном газе, в диоксид углерода.
20 Преимущественно, блок преобразования СО включает в себя реактор конверсии водяного газа для преобразования СО в присутствии водяного пара в CO_2 и H_2 . Конверсия СО не только значительно снижает содержание токсичного СО и не только позволяет удалить его вместе с исходным CO_2 на следующем шаге, но и
25 позволяет восстановить энергию, все еще содержащуюся в СО, путем генерации дополнительного водорода.

После этого полученный обработанный доменный газ поступает в блок 40 удаления CO_2 для улавливания и удаления большей части CO_2 (исходного и
30 произведенного блоком 30 преобразования СО). Улавливание и удаление может осуществляться любым подходящим способом, таким как один или несколько процессов физической адсорбции и/или химической абсорбции, например, адсорбция при переменном давлении (PSA), вакуумная адсорбция при переменном давлении (VPSA) и улавливание с помощью промывочной жидкости (жидкостей). Общее сокращение выбросов CO_2 зависит от исходного содержания

СО и СО₂, от процессов, используемых как в блоке преобразования СО, так и в блоке удаления СО₂. Однако, как правило, в потоке первичного обедненного СО₂ доменного газа, выходящего из блока удаления СО₂, может быть достигнуто снижение содержания СО₂ более чем на 85 %, более предпочтительно более чем на 90 % или даже более чем на 95 % по сравнению с исходным В доменного газа (или В1 или В2).

Полученный поток D первичного обедненного СО₂ доменного газа затем подается в первый смесительный блок 60, где он смешивается или может быть смешан с пропорцией В2, то есть второй частью, исходного доменного газа, если это необходимо для корректировки одного или более его свойств, таких как содержание СО₂, содержание СО, содержание Н₂, индекс Воббе и низшая теплотворная способность. Регулировка этих одного или нескольких свойств контролируется блоком управления (не показан) на основе измерения этих свойств первым анализатором 65, расположенным ниже по потоку от первого смесительного блока 60, и путем регулирования количества В2 доменного газа, добавляемого в первый смесительный блок 60 через байпас доменного газа, путем воздействия на регулятор 15 байпасного потока доменного газа, который может быть, например, управляемым клапаном. Поток обработки доменного газа, то есть часть В1, и поток байпаса доменного газа, то есть доля В2, складываются в общее количество потока В доменного газа.

Регулятор 15 перепускного потока доменного газа может быть настроен на преимущественное использование обедненного СО₂ доменного газа путем предпочтения использования первичного потока D обедненного СО₂ доменного газа, тем самым значительно снижая общее содержание СО₂ в выхлопе G в дымовой трубе 90 коксовой печи 80. В качестве альтернативы, управление регулятором 15 перепускного потока доменного газа может быть сделано так, чтобы преимущественно уменьшить отклонения одного или более из вышеупомянутых свойств путем регулировки потока через перепускной трубопровод для наилучшего выпрямления свойства или свойств, по крайней мере, пока это возможно в пределах скоростей смешивания потоков В2 и D. Управление регулятором 15 перепускного потока доменного газа, конечно, также может быть сделано так, чтобы наилучшим образом найти компромисс между снижением общего содержания СО₂ в выхлопе G и уменьшением отклонений.

Даже при снижении отклонений указанных одного или более свойств, которое может быть достигнуто за счет использования по меньшей мере некоторого первичного потока D обедненного CO_2 доменного газа вместо только исходного потока В2 доменного газа, обычно необходимо или желательно
5 дополнительно регулируется добавить долю коксового газа по тем же причинам, то есть для снижения отклонений и/или повышения теплотворной способности газового потока D.

Таким образом, первичный поток E обедненный CO_2 доменного газа выходящий из первого смесительного блока 60, подается во второй
10 смесительный блок 70 вместе с долей потока С коксового газа, причем эта доля регулируется с помощью регулятора 25 потока коксового газа. Опять же, управление регулятором выгодно осуществлять на основе одного или нескольких вышеупомянутых свойств, определяемых вторым анализатором 75
ниже по потоку от второго смесительного блока 70.

Аналогичным образом, управление регулятором 25 потока коксового газа
15 может быть сделано так, чтобы преимущественно использовать вторичный поток E обедненного CO_2 доменного газа, тем самым "поддерживая" снижение общего содержания CO_2 в выхлопе G в дымовой трубе 90 коксовой печи 80. В качестве альтернативы, управление регулятором 25 потока коксового газа может быть
20 сделано так, чтобы преимущественно уменьшить отклонения одного или более из вышеупомянутых свойств в третичном обедненном CO_2 потоке, путем регулировки потока из потока С коксового газа для наилучшего выпрямления свойства или свойств, по крайней мере, пока это возможно в пределах скоростей смешивания потоков С и E. Опять же, управление регулятором 25 потока
25 коксового газа может быть, конечно, также сделано так, чтобы наилучшим образом найти компромисс между снижением общего содержания CO_2 в выхлопе G и снижением указанных отклонений.

При необходимости или желании могут быть предусмотрены
дополнительные анализаторы, такие как третий анализатор 10.5, определяющий
30 одно или несколько свойств исходного потока доменного газа и/или четвертый анализатор 20.5, определяющий одно или несколько свойств потока С коксового газа. Значения определенных свойств могут быть поданы в блок управления для дальнейшего улучшения контроля состава и, таким образом, свойств третичного

потока обедненного CO_2 , который будет подаваться в систему обогрева с нижним подводом коксовой печи 80.

5 В коксовой печи (батарее) уголь превращается в кокс с помощью тепла, вырабатываемого системой обогрева с нижним подводом, сжигающей третичный поток F, обедненный CO_2 . В результате сжигания образуется выходящий поток G, а в результате коксования образуется коксовый газ H, который, как упоминалось ранее, может быть использован в качестве источника коксового газа в потоке C коксового газа.

10 В качестве примера того, что может быть достигнуто с помощью настоящего изобретения, приведена следующая таблица, которая показывает некоторые улучшения при работе согласно изобретению (газ с третичным CO_2) по сравнению с работой на смешанном доменном газе и коксового газа без CO_2 (обычный смешанный доменный газ и коксовый газ): в то время как низшая теплотворная способность может быть разумно повышена, выбросы CO_2 в трубу
15 могут быть значительно снижены.

Случай	Низшая теплотворная способность газа обогрева с нижним подводом	Выбросы CO_2 в трубе
	кДж/нм ³	кг CO_2 /т кокса
Смешанный доменный и коксовый газ (не в соответствии с изобретением)	3000 – 5000 Норма: 4200	675 – 1254
Третичный обедненный CO_2 газ (в соответствии с изобретением)	3700 – 5000 Норма: 4200	80 – 300

СПИСОК ССЫЛОЧНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- 10 Сеть доменного газа
- 10.5 Третичный анализатор
- 5 15 Регулятор байпасного потока доменного газа
- В Исходный поток доменного газа
- В1 Поток обработки доменного газа, так называемая часть исходного потока доменного газа
- В2 Байпасный поток доменного газа, так называемая часть исходного потока доменного газа
- 10 20 Сеть коксового газа (COG)
- 20.5 Четвертый анализатор
- 25 Регулятор потока коксового газа
- С Поток коксового газа
- 15 30 Блок конвертера СО
- 40 Блок удаления СО₂
- Д Первичный поток обедненного СО₂ доменного газа
- 60 Первый смесительный блок
- 65 Первый анализатор
- 20 Е Вторичный поток обедненного СО₂ доменного газа
- 70 Второй смесительный блок
- 75 Второй анализатор
- Ф Третичный поток обедненного СО₂ газа
- 80 Коксовая печь, коксовая батарея
- 25 G Выходящий поток из коксовой печи, выходящий поток
- 90 Дымовая труба
- Н Коксовый газ, образующийся в коксовой печи

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ эксплуатации коксогазового завода, включающий в себя следующие шаги:

- 5 а) обеспечение потока (В) доменного газа, включающего в себя монооксид углерода СО, диоксид углерода СО₂ и водород Н₂, и потока (С) коксового газа, включающего в себя водород Н₂, монооксид углерода СО и метан СН₄,
- 10 б) обработка части (В1) потока (В) доменного газа путем преобразования монооксида углерода в диоксид углерода в блоке (30) конвертера СО для получения обработанного потока доменного газа,
- в) воздействие на обработанный поток доменного газа, полученный на шаге б), для удаления диоксида углерода в блоке (40) удаления СО₂ для получения первичного потока (D) обедненного СО₂ доменного газа,
- 15 г) смешивание первичного потока (D) обедненного СО₂ доменного газа, полученного на шаге в), с долей (В2) потока (В) доменного газа в первом смесительном блоке (60) для получения вторичного потока (E) обедненного СО₂ доменного газа,
- д) смешивание вторичного потока (E) обедненного СО₂ доменного газа, полученного на шаге г), с долей потока (С) коксового газа во втором
- 20 смесительном блоке (70) для получения третичного потока (F) обедненного СО₂ газа,
- е) подача третичного потока (F) обедненного СО₂ газа в систему обогрева с нижним подводом коксовой печи (80) коксогазового завода для преобразования угля в кокс с получением коксового газа (H) и отходящего газа (G),
- 25 причем свойства вторичного потока (E) обедненного СО₂ доменного газа определяют первым анализатором (65) ниже по потоку от первого смесительного блока (60), а свойства третичного потока (F) обедненного СО₂ газа определяют вторым анализатором (75) ниже по потоку от второго смесительного блока (70), причем долю (В2) потока (В) доменного газа и долю потока (С) коксового газа
- 30 регулируют на основе свойств, определенных первым (65) и вторым (75) анализаторами, для регулировки по меньшей мере одного из содержания СО₂, содержания СО, содержания Н₂, индекса Воббе, стехиометрической потребности в воздухе для горения и низшей теплотворной способности в третичном потоке

(F) обедненного CO_2 газа, тем самым регулируя работу системы обогрева с нижним подводом.

5 2. Способ по п. 1, причем долю (B2) потока (B) доменного газа и долю потока (C) коксового газа регулируют на основе свойств, определенных первым (65) и вторым (75) анализаторами, для регулировки по меньшей мере одного из индекса Воббе и низшей теплотворной способности в третичном потоке (F) обедненного CO_2 газа.

10 3. Способ по п. 1 или п. 2, причем долю (B2) потока (B) доменного газа и долю потока (C) коксового газа регулируют для уменьшения отклонений в работе системы обогрева с нижним подводом.

15 4. Способ по п. 1 или п. 2, причем долю (B2) потока (B) доменного газа и долю потока (C) коксового газа регулируют для снижения содержания CO_2 в отходящем газе (G) и/или CO_2 -отпечатка отходящего газа (G).

20 5. Способ по любому из предшествующих пунктов, причем долю (B2) потока (B) доменного газа и долю потока (C) коксового газа регулируют для достижения целевого значения индекса Воббе и/или для повышения низшей теплотворной способности третичного потока (F) обедненного CO_2 газа.

25 6. Способ по п. 5, причем индекс Воббе третичного потока обедненного CO_2 газа регулируют, чтобы он находился в диапазоне +/- 20 %, предпочтительно +/- 15 %, более предпочтительно +/- 10 % от заданного целевого значения индекса Воббе.

30 7. Способ по п. 5 или п. 6, причем индекс Воббе третичного потока обедненного CO_2 газа регулируют в диапазоне от 3,5 до 7 МДж/Нм³, предпочтительно в диапазоне от 5 до 6 МДж/Нм³.

8. Способ по одному из п.п. 5-7, причем низшую теплотворную способность третичного потока обедненного CO_2 газа повышают по меньшей мере на 10 %, предпочтительно по меньшей мере на 20 %, более

предпочтительно по меньшей мере на 30 %, по сравнению с низкой теплотворной способностью доменного газа из источника доменного газа.

5 9. Способ по одному из п.п. 5-7, причем низшую теплотворную способность потока третичного обедненного CO_2 газа регулируют в диапазоне от 3700 до 5300 кДж/нм³, предпочтительно в диапазоне от 4100 до 5000 кДж/нм³.

10 10. Способ, по любому из предшествующих пунктов, причем на шаге б) обработка части (В1) потока (В) доменного газа в блоке (30) конвертера CO включает в себя реакцию сдвига водяного газа.

15 11. Способ по любому из предшествующих пунктов, причем на шаге в) удаление диоксида углерода в блоке удаления CO_2 включает в себя одну или несколько физических адсорбций и/или химических абсорбций, таких как адсорбция при переменном давлении (PSA), вакуумная адсорбция при переменном давлении (VPSA) и улавливание промывочной жидкостью(ями).

20 12. Способ по любому из пп. 1-9, причем обе ступени б) и в) осуществляют в реакторе конверсии водяного газа с сорбционным усилением.

25 13. Способ по любому из предшествующих пунктов, причем на шаге в) удаление диоксида углерода в блоке удаления CO_2 происходит таким образом, что содержание CO_2 в первичном потоке (D) обедненного CO_2 доменного газа, составляет не более 7,5 % по объему, предпочтительно не более 5 % по объему, более предпочтительно не более 2,5 % по объему.

14. Коксогазовый завод, включающий в себя:

30 а) источник доменного газа, прежде всего сеть (10) доменного газа, выполненная для обеспечения потока (В) доменного газа, включающего в себя монооксид углерода CO , диоксид углерода CO_2 и водород H_2 , и

источник коксового газа, прежде всего сеть (20) коксового газа, выполненная для обеспечения потока (С) коксового газа, включающего в себя водород H_2 , монооксид углерода CO и метан CH_4 ,

б) блок (30) конвертера CO, соединенный с источником доменного газа и выполненный для обработки части (B1) потока (B) доменного газа путем преобразования монооксида углерода в диоксид углерода для получения обработанного потока доменного газа,

5 в) блок (40) удаления CO₂, соединенный с блоком (30) конвертера CO и выполненный для удаления диоксида углерода из обработанного потока доменного газа для получения первичного потока (D) обедненного CO₂ доменного газа,

10 г) первый смесительный блок (60), соединенный с блоком (40) удаления CO₂ и управляемо соединенный с источником доменного газа, причем первый смесительный блок (70) выполнен для смешивания первичного потока (D) обедненного CO₂ доменного газа из блока (40) удаления CO₂ с долей (B2) потока (B) доменного газа для получения вторичного потока (E) обедненного CO₂ доменного газа, причем управляемое соединение с источником доменного газа
15 включает в себя управляемый регулятор (15) перепускного потока доменного газа,

д) второй смесительный блок (70), соединенный с первым смесительным блоком (60) и управляемо соединенный с источником коксового газа, причем
20 второй смесительный блок (70) выполнен для смешивания вторичного потока (E) обедненного CO₂ доменного газа из первого смесительного блока (60) с частью потока (C) коксового газа для получения третичного потока (F) обедненного CO₂ газа, причем управляемое соединение с источником коксового газа включает в себя управляемый регулятор потока (25) коксового газа,

е) коксовая печь (80) из коксогазового завода, включающая в себя систему
25 обогрева с нижним подводом, соединенную со вторым смесительным блоком (70) и выполненную для сжигания третичного потока (F) обедненного CO₂ газа для преобразования угля в кокс с получением коксового газа (H) и отходящего газа (G),

причем коксогазовый завод также включает в себя первый анализатор (65),
30 расположенный ниже по потоку от первого смесительного блока (60) и выполненный для определения свойств вторичного потока (E) обедненного CO₂ доменного газа, и второй анализатор (75), расположенный ниже по потоку от второго смесительного блока (70) и выполненный для определения свойств третичного потока (F) обедненного CO₂ газа, блок управления, выполненный для

управления работой системы обогрева с нижним подводом путем определения доли (B2) потока (B) доменного газа и доли потока (C) коксового газа на основе свойств, полученных от первого (65) и второго (75) анализаторов, и путем управления управляемым регулятором (15) перепускного потока доменного газа и управляемым регулятором (25) потока коксового газа таким образом, чтобы регулировать по меньшей мере одно из содержания CO_2 , содержания CO , содержания H_2 , индекса Воббе, стехиометрической потребности в воздухе для горения и низшей теплотворной способности в третичном потоке (F) обедненного CO_2 газа.

10

15. Коксогазовый завод по п. 14, причем блок (30) конвертера CO включает в себя реактор конверсии водяного газа.

15

16. Коксогазовый завод по п. 14 или п. 15, причем блок удаления CO_2 включает в себя одно или более из устройства физической адсорбции и/или устройства химической абсорбции, таких как устройство адсорбции при переменном давлении (PSA), устройство вакуумной адсорбции при переменном давлении (VPSA) и устройство улавливания промывочной жидкости (жидкостей).

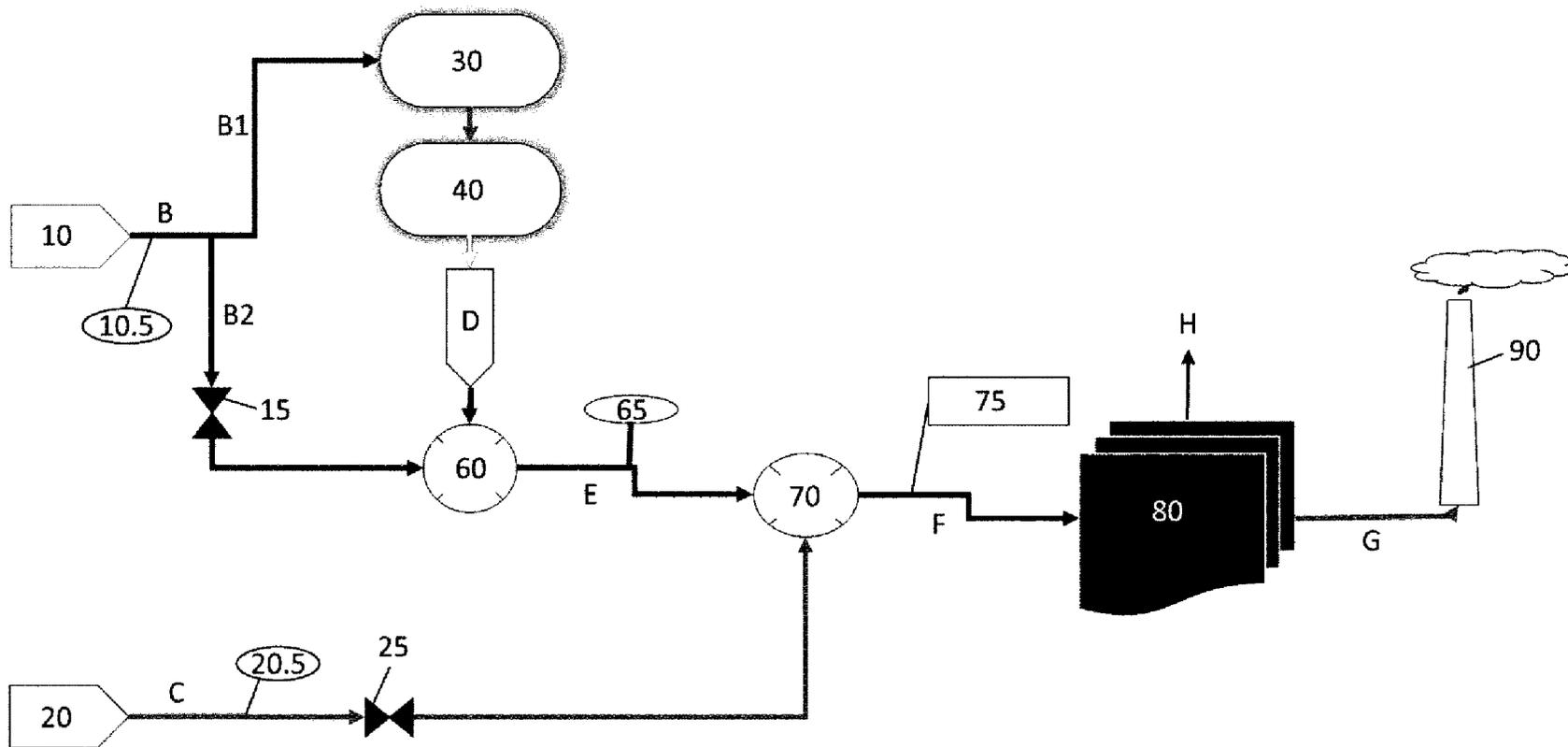
20

17. Коксогазовый завод по п. 14, причем блок (30) конверсии CO и блок (40) удаления CO_2 образованы реактором конверсии водяного газа с сорбционным усилением.

25

18. Коксогазовый завод по одному из п.п. 14-17, причем блок удаления CO_2 работает таким образом, что содержание CO_2 в первичном потоке (D) обедненного CO_2 доменного газа составляет не более 7,5 % по объему, предпочтительно не более 5 % по объему, более предпочтительно не более 2,5 % по объему.

30



Фиг. 1