



УКРАЇНА

(19) UA (11) 21710 (13) A

(51)6 C 21 B 13/00

ДЕРЖАВНЕ
ПАТЕНТНЕ
ВІДМІСТВООПИС ДО ПАТЕНТУ
НА ВІНАХІДбез проведення експертизи по суті
на підставі Постанови Верховної Ради України
№ 3769-XII від 23.XII. 1993 р.Публікується
в редакції заявника

(54) СПОСІБ ОДЕРЖАННЯ ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВОГО РОЗПЛАВУ

1

2

1

(21) 95073085

(22) 03.07.95

(24) 20.01.98

(46) 30.04.98. Бюл. № 2

(47) 20.01.98

(56) 1. Авторское свидетельство СССР
№ 1363858, кл. C 21 B 13/00.2. Авторское свидетельство СССР
№ 1608226, кл. C 21 B 13/00.3. Итоги науки и техники (ВИНИТИ).
Сер. "Производство чугуна и стали", 1984,
т. 15, с. 91-92.(72) Капустін Євгеній Олександрович, Сущенко
Андрій Вікторович, Капустін Олексій

Євгеньович, Логозинська Вікторія Миколаївна

(73) Приазовський державний технічний

університет

(57) 1. Способ получения железоуглероди-
стого расплава, содержащий загрузку свер-
ху железорудных материалов, нагрев их и
частичное восстановление отходящим га-
зом, дальнейший нагрев, плавление и окон-
чательное восстановление в расплаве,
вдувание в расплав с газом-носителем угле-
родсодержащих материалов, загрузку шла-
кообразующих материалов и выпуск жидких
металла и шлака, отличающийся тем,
что в движущийся в противотоке к железо-
рудному материалу отходящий из расплава
газ выше уровня жидкого металла подают
дополнительный кислородсодержащий газ,
обеспечивая степень восстановления желе-
зорудных материалов в газовой фазе от 5 до
40 %.2. Способ по п. 1, отличающийся
тем, что степень восстановления железоруд-
ных материалов в газовой фазе регулируют
составом и удельным расходом дополни-тельного кислородсодержащего газа, изме-
няя его в пределах

$$0,3[(1 - 0,02q_r) - k_1(1 - 0,01q_r)]/\eta_0 \leq$$

$$\leq m_g \leq [232k_2k_3(F_{m.r.}/G) \cdot$$

$$\cdot (P/T_{m.r.} \cdot \rho_4 d_4)^{1/2} -$$

$$- (m_{и.ж.} + 1,56k_2k_4m_{о.ж.})]/(1 - \eta_0),$$

где m_g – удельный расход дополнительного
кислородсодержащего газа, кг/кг Fe_2O_3 же-
лезорудных материалов; q_r – степень восстановления железоруд-
ных материалов (ЖРМ) в газовой фазе, %; η_0 – массовая доля кислорода в допол-
нительном кислородсодержащем газе; G – расход ЖРМ (в пересчете через Fe_2O_3
ЖРМ), кг/с (производительность агрегата); P – давление в газовой фазе, МПа; $F_{m.r.}$, $T_{m.r.}$ – площадь минимального по-
перечного сечения противоточного столба от-
ходящего газа и ЖРМ (выше уровня подачи
дополнительного кислородсодержащего га-
за), м и температура газа в этом сечении, К; ρ_4 , d_4 – плотность и минимальный диа-
метр частиц загружаемого ЖРМ, кг/м³ и м; $m_{и.ж.}$ – удельный расход инертных и ней-
тральных газов, вдуваемых в жидкий металл,
кг/кг Fe_2O_3 ЖРМ; $m_{о.ж.}$ – удельный расход активного кис-
лорода, вдуваемого в жидкий металл, кг/кг
 Fe_2O_3 ЖРМ; k_1 – коэффициент, учитывающий окисле-
ние выделяющегося из расплава газа при
прохождении его через металл и шлак, рав-
ный 0,05-0,20;

(19) UA (11) 21710 (13) A

k_2 — коэффициент, учитывающий отклонение состава газа, равный 0,9–1,1;

k_3 — коэффициент, учитывающий отклонение геометрических размеров системы, равный 0,9–1,1;

k_4 — коэффициент, учитывающий степень использования кислорода, вдуваемого в жидкий металл, на окисление углерода, равный 0,8–1,0

3. Способ по п. 1, отличающийся тем, что дополнительный кислородсодержащий газ подают на высоте H от уровня жидкого металла, причем $H < H_{\max}$, где H_{\max} — высота по потоку отходящего газа, где температура последнего составляет 700 К.

Изобретение относится к металлургии, к области бескоксового (бездоменного) получения железа из железорудных материалов.

Известен способ получения стали или чугуна [1], включающий подачу в железоуглеродистый расплав под уровень в потоке газа предварительно нагретого (до 1590–1760°C) измельченного железорудного концентрата со скоростью 0,5–1,5 м и углеродсодержащего материала.

Для реализации известного способа необходимо осуществление предварительного нагрева до высоких температур железорудного концентрата и углеродсодержащего материала, что приводит к высоким затратам энергии. Кроме того, выделяющиеся из расплава в больших количествах газы, состоящие преимущественно из CO (оксида углерода) и обладающие высокой физической ($t = 1300\text{--}1700^\circ\text{C}$) и химической $Q_{\text{нр}} = 10\text{--}16$ МДж/м³ теплотой, не используются непосредственно в процессе. Это не позволяет получить высокую экономичность (высокий энергетический КПД и низкий удельный расход топлива) процесса и усложняет его реализацию (необходимость применения плазмотрона, транспорт высокотемпературных двухфазных сред и т.д.).

Известен способ восстановления железорудного сырья в жидкой шлаковой ванне [2], включающий подачу железорудного концентрата или аглоруды, флюса и угля, сжигание угля в слое шлака подачей кислородсодержащего газа, дожигание выделяющейся окиси углерода и непрерывный выпуск жидких продуктов плавки, причем интенсивность подачи угля поддерживается в пределах 0,2–5,0 т/час на

4. Способ по п. 1, отличающийся тем, что давление в потоке отходящего газа поддерживают в пределах 0,1–2,0 МПа.

5. Способ по п. 1, отличающийся тем, что дополнительный кислородсодержащий газ подают тангенциально потоку отходящего газа.

6. Способ по п. 1, отличающийся тем, что шлакообразующие материалы подают совместно с железорудными материалами.

7. Способ по п. 1, отличающийся тем, что регулирование состава и расхода дополнительного кислородсодержащего газа осуществляют посредством рециркуляции отходящего газа.

1 м² площади расплава, а кислородом дутья сжигают 8–50% угля.

В известном способе отходящие из ванны газы дожигаются над ней кислородом с выделением большого количества теплоты. Однако лишь часть ее (до 50%) передается расплаву (полезно используется), остальная — выбрасывается из агрегата вместе с высокотемпературными (1200–1600°C) газами. Это не позволяет получить высокую экономичность процесса (высокий энергетический КПД и низкий удельный расход топлива). Кроме того, восстановление железорудных материалов в известном способе осуществляется преимущественно в шлаке твердофазным углеродом (угля), что не позволяет получить высокую скорость восстановления, т.е. высокую производительность процесса.

Наиболее близким по технической сущности и достигаемому результату к предлагаемому является способ получения железоуглеродистого расплава C01N (ФРГ) [3] — прототип, включающий загрузку сверхжелезорудных материалов в восстановительную шахтную печь, нагрев их и частичное восстановление в этой печи газом, отходящим из плавильной печи, подачу предварительно восстановленных железорудных материалов в плавильную печь, дальнейший их нагрев, плавление и окончательное жидкофазное восстановление в расплаве, вдувание в расплав твердого углеродсодержащего материала (угля) вместе с газом-носителем, охлаждение выходящего из плавильной печи горячего газа до 1000°C, смешивание его с рециркулирующим колошниковым газом, пропуск его через циклон и подачу в восстановительную

печь, отмычку отходящего из восстановительной печи газа от CO_2 , дополнительный подогрев его и частичную выдачу на сторону (внешнему потребителю) и рециркуляцию в процессе, загрузку шлакообразующих материалов в плавильную печь, периодический выпуск жидких металла и шлака, а также поддержание избыточного давления газа в плавильной печи.

При реализации известного способа физическая и химическая теплота отходящего из расплава газа используется на нагрев и частичное восстановление железорудного материала в шахтной восстановительной печи. Однако из-за отсутствия дожигания газа, химическая энергия его в этой печи используется не полностью (в отходящих газах содержится большое количество CO). Это "привязывает" работу агрегата к "внешнему потребителю" энергии и не позволяет получить высокую экономичность процесса. Кроме того, степень газового восстановления железорудных материалов в известном способе составляет более 60%. Это приводит к дополнительному расходу топлива (углеродсодержащих материалов на получение дополнительного количества восстановительного газа) и также не позволяет получить высокую экономичность процесса. При этом отсутствует возможность регулирования степени газового (твердофазного) и степени жидкофазного восстановления железорудных материалов в процессе, что также снижает экономичность способа.

При реализации известного способа восстановление железорудных материалов осуществляется преимущественно в твердофазном состоянии восстановительным газом. Это не позволяет достичь высокие скорости восстановления и удельную производительность агрегата. Кроме того, сложная схема организации газового тракта в известном способе (наличие систем охлаждения и подогрева газа, отмычки от CO и др.) не позволяет обеспечить его простую и надежную организацию и управление.

В основу изобретения поставлена задача усовершенствовать способ получения железуглеродистого расплава, в котором за счет введения нового действия и условий его выполнения достигается более полное использование химической и физической теплоты отходящих из расплава газов в основном процессе и возможность регулирования степеней газового и жидкофазного восстановления железорудных материалов, повышается их скорость восстановления и упрощается схема организации газового тракта, что приводит к повышению эконо-

мичности способа (снижению удельного расхода топлива), повышению производительности, а также упрощению его реализации и управления.

Для решения поставленной задачи в способе получения железуглеродистого расплава, содержащем загрузку сверху железорудных материалов, нагрев их и частичное восстановление отходящим газом, дальнейший нагрев, плавление и окончательное восстановление в расплаве, вдувание в расплав с газом-носителем углеродсодержащих материалов, загрузку шлакообразующих материалов и выпуск жидких металлов и шлака, в движущийся в противотоке к железорудному материалу, отходящий из расплава газ, выше уровня жидкого металла, подают дополнительный кислородсодержащий газ, обеспечивая степень восстановления железорудных материалов в газовой фазе от 5 до 40%. При этом степень восстановления железорудных материалов в газовой фазе регулируют составом и удельным расходом дополнительного кислородсодержащего газа, изменяя его в пределах

$$0,3[(1 - 0,02q_r) - k_r(1 - 0,01q_r)]/\eta_0 \leq \\ \leq m_g \leq [232k_2k_3(F_{m,r}/G) \cdot \\ \cdot (P/T_{m,r} \cdot \rho_4 d_4)^{1/2} - \\ - (m_{и,ж} + 1,56k_2k_4m_{о,ж})]/(1 - \eta_0),$$

где m_g — удельный расход дополнительного кислородсодержащего газа, кг/кг Fe_2O_3 железорудных материалов;

q_r — степень восстановления железорудных материалов (ЖРМ) в газовой фазе, %;

η_0 — массовая доля кислорода в дополнительном кислородсодержащем газе;

G — расход ЖРМ (в пересчете через Fe_2O_3 ЖРМ), кг/с (производительность агрегата);

P — давление в газовой фазе, МПа;

$F_{m,r}$, $T_{m,r}$ — площадь минимального поперечного сечения противоточного столба отходящего газа и ЖРМ (выше уровня подачи дополнительного кислородсодержащего газа), м и температура газа в этом сечении, К;

ρ_4 , d_4 — плотность и минимальный диаметр частиц загружаемого ЖРМ, кг/м³ и м;

$m_{и,ж}$ — удельный расход инертных и нейтральных газов, вдуваемых в жидкий металл, кг/кг Fe_2O_3 ЖРМ;

$m_{о,ж}$ — удельный расход активного кислорода, вдуваемого в жидкий металл, кг/кг Fe_2O_3 ЖРМ.

k_1 – коэффициент, учитывающий окисление выделяющегося из расплава газа при прохождении его через металл и шлак, равный 0,05–0,20;

k_2 – коэффициент, учитывающий отклонение состава газа, равный 0,9–1,1,

k_3 – коэффициент, учитывающий отклонение геометрических размеров системы, равный 0,9–1,1,

k_4 – коэффициент, учитывающий степень использования кислорода, вдуваемого в жидкий металл, на окисление углерода, равный 0,8–1,0

Кроме того, дополнительный кислородсодержащий газ подают на высоте H от уровня жидкого металла, причем $H < H_{\max}$, где H_{\max} – высота по потоку отходящего газа, где температура последнего составляет 700 К. Кроме того, давление в потоке отходящего газа поддерживается в пределах 0,1–2,0 МПа. Кроме того, дополнительный кислородсодержащий газ подают тангенциально потоку отходящего газа в виде вихревого потока. Кроме того, шлакообразующие материалы подают совместно с железорудными материалами. Кроме того, дополнительный кислородсодержащий газ подают совместно с железорудными материалами. Кроме того, регулирование расхода и состава дополнительного кислородсодержащего газа осуществляют посредством рециркуляции отходящего газа.

Подача дополнительного кислородсодержащего газа в движущийся в противоток к железорудному материалу отходящий из расплава газ, выше уровня металлического расплава, позволяет частично дожигать СО и Н в отходящем газе с выделением теплоты (превращение химической теплоты в физическую), остальная часть химического потенциала отходящих газов расходуется на эндотермические реакции восстановления ЖРМ в твердофазном состоянии. При этом повышается степень использования физической и химической теплоты отходящих газов в процессе. Изменение количества дожигаемого газа приводит к изменению соотношения степеней газового и жидкофазного восстановления ЖРМ в процессе. При степени газового (твердофазного) восстановления ЖРМ (q_r), изменяющейся в пределах от 5 до 40% за счет оптимального перераспределения химической энергии образующегося в расплаве газа между процессами предварительного нагрева и восстановления ЖРМ достигается минимальный расход топлива в процессе, т.е. максимальная экономичность последнего. При этом восстановление ЖРМ осуществляется преимущественно в жидкой фазе растворенным в ме-

талле углеродом, что обеспечивает высокие скорость восстановления и производительность процесса. При $q_r < 5\%$ резко увеличивается температура отходящих из агрегата газов (неполное использование физической теплоты отходящего газа), что снижает экономичность процесса. При $q_r > 40\%$ снижается скорость восстановления ЖРМ и резко возрастает расход топлива. Это происходит из-за того, что часть необходимого для обеспечения заданной величины q_r СО при этом образуется не по реакциям взаимодействия углерода расплава с оксидами железа ЖРМ, а в результате окисления углерода расплава кислородом. При этом также перерасходуется и кислород. Это приводит к снижению экономичности процесса в целом и снижению его производительности. Кроме того, при указанной организации процесса исключается необходимость в дополнительных системах подогрева, охлаждения и отмыки от СО отходящих газов, что позволяет упростить организацию газового тракта и конструкцию агрегата (совместить обе печи в одной), а следовательно, упростить реализацию и управление процессом в целом

Регулирование параметра q_r при этом наиболее просто и надежно технически осуществляется изменением состава расхода дополнительного кислородсодержащего газа. При изменении удельного расхода дополнительного кислородсодержащего газа в указанных пределах обеспечивается одновременно заданная величина q_r и равномерное движение противоточного столба отходящих газов и ЖРМ. При значениях m_d менее указанного нижнего предела поступающего дополнительного газа недостаточно для заданной степени газового восстановления q_r (величина q_r становится больше заданной), а при значениях m_d более указанного верхнего предела начинается "запирание" схода ЖРМ и сильный вынос мелких фракций ЖРМ с отходящим газом из агрегата.

Подача дополнительного кислородсодержащего газа ниже уровня металлического расплава неэффективна, т.к. при этом практически весь кислород газа используется на окисление металла. При подаче дополнительного газа на высоте $H < H_{\max}$ от уровня жидкого металла, где H_{\max} – высота по потоку отходящего газа с температурой последнего 700 К, обеспечивается практически полное (до термодинамического равновесия) усвоения его в процессе (на окисление СО и Н₂). При $H < H_{\max}$ из-за недостаточной температуры резко замедляются химические реакции в газовой фазе и наблюдается неполное усвоение кислорода

дополнительного газа (частичный выход его вместе с отходящими газами из агрегата).

Поддержание давления в потоке отходящего газа в пределах 0,1–2,0 МПа позволяет повысить экономичность и производительность способа за счет увеличения полноты протекания реакций образования CO_2 (повышения термодинамически равновесного содержания CO_2 в отходящих из агрегата газах) и скорости протекания тепломассообменных процессов. При $P < 0,1$ МПа возникает опасность подсоса в газовый тракт окружающего воздуха, что приводит к дополнительным затратам теплоты и снижает экономичность способа. При $P > 2,0$ МПа резко снижается надежность работы высокотемпературных узлов агрегата, возникает необходимость в использовании специальных дорогих сверхпрочных материалов, что также снижает экономичность процесса.

Подача дополнительного кислородсодержащего газа тангенциально потоку отходящего из расплава газа позволяет организовать вихревую зону интенсивного тепломассообмена между отходящим газом, дополнительным газом и частицами ЖРМ, увеличить время пребывания частиц ЖРМ в газовой фазе агрегата. Это, в свою очередь, позволяет уменьшить рабочую высоту газового столба (выполнить агрегат для реализации способа более компактным), снизить удельные капитальные затраты и, в конечном итоге, повысить экономичность способа.

Подача шлакообразующих материалов совместно с ЖРМ позволяет обеспечить их предварительный прогрев отходящим газом. В результате этого, с одной стороны, повышается скорость реакций шлакообразования и более полно усваиваются (экономятся) шлакообразующие материалы, а с другой – снижается температура отходящего газа (более полно реализуется физическая теплота отходящего газа в процессе). Повышается экономичность процесса в целом. Кроме того, появляется возможность отказаться от использования дополнительных печей для термической обработки шлакообразующих материалов (например, печей для обжига известняка и получения извести) и проводить эту обработку непосредственно в рамках этого способа. Регулирование расхода и состава дополнительного кислородсодержащего газа посредством рециркуляции отходящего газа в процессе позволяет уменьшить потребление дополнительных газов (энергоносителей) и тем самым повысить экономичность способа.

Способ осуществляется в реакторе 1 (см. чертеж), по высоте которого расположены

устройства для ввода реагентов и вывода продуктов реакций. В верхней части реактора расположены устройства 2 для ввода ЖРМ. Ниже расположены устройства 3 для ввода дополнительного кислородсодержащего газа. В нижней части реактора расположены устройства: 4 – для вдувания в расплав дополнительного углеродсодержащего материала, 5 – для отвода жидкого металла (железоуглеродистого расплава) и 6 – для отвода жидкого шлака. Загружаемый в реактор 1 через устройства 2 ЖРМ – 7 движется вниз в противотоке с восходящим газом 8, образующимся в расплаве – 9 и имеющим на выходе из него высокий физический (t 1250–1650°C) и химический (80–90% CO ; $Q_{\text{H}^P} = 10\text{--}16$ МДж/м³) потенциал. Вдуваемый через устройства 3, находящиеся выше уровня металлического расплава, дополнительный кислородсодержащий газ – 10 реагирует с оксидом углерода (CO) отходящего газа. При этом химическая энергия отходящего газа превращается в тепловую. Физическая теплота отходящего газа используется на нагрев ЖРМ, а оставшаяся химическая энергия – на частичное восстановление ЖРМ в газовой фазе реактора (до попадания их в расплав). Расход и состав дополнительного кислородсодержащего газа устанавливают таким образом, чтобы степень восстановления ЖРМ в газовой фазе находилась в диапазоне 5–40%. При этом наиболее оптимальным способом ввода дополнительного кислородсодержащего газа – 10 является подача его тангенциально к направлению движения отходящего газа – 8, в виде вихревого потока, что обеспечивает образование вихревой зоны интенсивного тепломассообмена между отходящим газом – 8, дополнительным газом – 10 и ЖРМ – 7. Подача дополнительного газа 10 может осуществляться на нескольких уровнях. Высота на которой обеспечивается ввод дополнительного газа 10 (от уровня металлического расплава) находится на расстоянии $H < H_{\text{max}}$, где H_{max} – высота, где температура отходящего газа – 8 (контролируется одним из известных устройств, например, отсасывающей термопарой) меньше 700 К.

Нагретые и частично восстановленные ЖРМ попадают в расплав 9, состоящий из жидкого шлака 11 и жидкого металла (железоуглеродистого расплава) – 12, где они дополнительно нагреваются, расплавляются и окончательно восстанавливаются (до $q_r = 100\%$) в жидкофазном состоянии преимущественно углеродом, растворенным в железоуглеродистом расплаве 12 с высокой скоростью. При этом выделяется большое количество газа, содержащего до 80–95%

СО который непрерывно отходит из расплава восходящим потоком. Для обеспечения непрерывности протекания процесса в расплаве 12 через устройства 4 вдувают углеродсодержащий материал — 13 в потоке газа-носителя. В качестве газа-носителя используют и чертный, нейтральный или кислородсодержащий газ. Наиболее оптимальное содержание кислорода в нем находится в пределах от 10 до 20% (для предотвращения "замораживания" зоны вдувания углеродсодержащего материала в расплав). Восстановленное железо из ЖРМ переходит в металлический расплав, примеси ЖРМ и углеродсодержащего материала — в газовую фазу и шлак. Для формирования активного рафинирующего шлака в ванну подаются шлакообразующие материалы — 14 (известь, известняк, плавиковый шпат, бокситы и др.). Наиболее оптимально подача шлакообразующих материалов осуществляется через устройства 2 совместно с ЖРМ. При этом шлакообразующие материалы — 14, проходя через газовую фазу 8 реактора, дополнительно прогреваются и охлаждают отходящий газ 8. Для поддержания необходимого уровня жидкого металла 12 и жидкого шлака 11 в агрегате 1 через устройства 5 и 6 непрерывно или периодически отводят жидкий металл 12 и шлак 11. Давление газов в агрегате регулируется в диапазоне 0,1–2,0 МПа (регулируемое его осуществляется известным устройством, например, шибром на выходе из агрегата). Отходящий из реактора 1 газ 8 подают на очистку и "сбрасывают" в атмосферу без дожигания на "свече", т.к. он содержит СО в малых количествах. При этом наиболее целесообразно часть этого газа после очистки использовать для разбавления кислорода дополнительного газа 10, а также в качестве газа-носителя углеродсодержащего материала 13. Изменяя соотношение подаваемых количеств ЖРМ и углеродсодержащего материала в реактор получают продукт (железоуглеродистый расплав) с содержанием углерода от 0,1 до 4%.

В табл. 1 приведены данные численного эксперимента, проведенного с использованием ПЭВМ по влиянию степени восстановления ЖРМ в газовой фазе (q_r) на физический потенциал (температуру) и химический потенциал (содержание СО) отходящего из реактора газа, а также на удельный расход энергии (ГДж/т продукта) и удельный расход условного энергетического ($Q_{н.р} = 29,4$ МДж/кг) топлива (кг/т продукта) в процессе (при условии, что продукт — железоуглеродистый расплав имеет температуру на выпуске 1300°C и содержание уг-

лерода — 4%). В табл. 1 также приведены аналогичные данные для прототипа и доменного процесса.

Как видно из табл. 1, наиболее оптимальный диапазон величины q находится в пределах от 5 до 40%. При $q < 5\%$ удельный расход топлива резко увеличивается из-за неполного использования физической теплоты отходящего газа. Из-за увеличения его температуры снижается также степень доокисления СО до CO_2 , т.е. снижается и использование химической энергии отходящего газа в процессе. При $q > 40\%$ расход топлива увеличивается до значения прототипа из-за необходимости дополнительного ввода углеродсодержащего материала на выработку восстановительного газа, а также из-за снижения степени использования химической теплоты отходящего газа.

Исходя из физических условий протекания процесса: на основе термодинамических зависимостей взаимодействия ЖРМ с газовой фазой в агрегате, а также на основе газодинамических зависимостей взаимодействия восходящего газового потока с "падающими" частицами ЖРМ, установлено, что удельный расход дополнительного кислородсодержащего газа (кг/кг Fe_2O_3 ЖРМ) должен находиться в диапазоне

$$0,3[(1 - 0,02q_r) - k_1(1 - 0,01q_r)]/\eta_0 \leq$$

$$\leq m_g \leq [232k_2k_3(F_{m.r}/G) \cdot$$

$$\cdot (P/T_{m.r} \cdot \rho_4 d_4)^{1/2} -$$

$$- (m_{и.ж} + 1,56k_2k_4m_{о.ж})/(1 - \eta_0),$$

где q_r — степень восстановления железорудных материалов (ЖРМ) в газовой фазе, %;

η_0 — массовая доля кислорода в дополнительном кислородсодержащем газе;

G — расход ЖРМ (в пересчете через Fe_2O_3 ЖРМ), кг/с (производительность агрегата);

P — давление в газовой фазе, МПа;

$F_{m.r}$, $T_{m.r}$ — площадь минимального поперечного сечения противоточного столба отходящего газа и ЖРМ (выше уровня подачи дополнительного кислородсодержащего газа), м и температура газа в этом сечении, К;

ρ_4 , d_4 — плотность и минимальный диаметр частиц загружаемого ЖРМ, кг/м³ и м,

$m_{и.ж}$ — удельный расход инертных и нейтральных газов, вдуваемых в жидкий металл, кг/кг Fe_2O_3 ЖРМ;

$m_{о.ж}$ — удельный расход активного кислорода, вдуваемого в жидкий металл, кг/кг Fe_2O_3 ЖРМ;

k_1 — коэффициент, учитывающий окисление выделяющегося из расплава газа при прохождении его через металл и шлак, равный 0,05–0,20;

k_2 — коэффициент, учитывающий отклонение состава газа, равный 0,9–1,1;

k_3 — коэффициент, учитывающий отклонение геометрических размеров системы, равный 0,9–1,1;

k_4 — коэффициент, учитывающий степень использования кислорода, вдуваемого в жидкий металл, на окисление углерода, равный 0,8–1,0.

При значениях удельного расхода кислородсодержащего газа m меньше нижнего предела, определяемого из приведенного выше выражения, не достигается заданная степень восстановления ЖРМ в газовой фазе из-за недостатка активного кислорода в последней, при значениях m больше верхнего предела наблюдается "запирание" схода ЖРМ, нарушается стабильность процесса, появляется вынос мелких фракций частиц ЖРМ с отходящим из реактора газом. В обоих случаях резко снижается экономичность процесса.

В табл. 2 приведено влияние температуры газа (по высоте H над уровнем жидкого расплава) на наличие непрореагировавшего активного кислорода в отходящем из реактора газе.

Как видно из табл. 2, подача дополнительного газа на высоте свыше H_{\max} от уровня металлического расплава, где H_{\max} — высота газового потока с температурой последнего 700 К, нецелесообразна, т.к. это приводит к резкому увеличению степени неусвоения активного кислорода дополнительного газа и приводит к снижению экономичности процесса. Подача дополнительного газа ниже уровня металлического расплава неэффективна по причине взаимодействия активного кислорода в этом случае не с монооксидом углерода, а с железоуглеродистым расплавом.

В табл. 3 приведены данные численного моделирования на ЭВМ по влиянию давления в потоке отходящего газа на использование его химического потенциала в процессе (на содержание CO , %).

При давлении в газовой фазе агрегата $P < 0,1$ МПа возможны подсосы окружающего воздуха через неплотности тракта, что приводит к попаданию азота и снижению экономичности процесса. С увеличением P увеличивается степень использования химической энергии отходящего из расплава газа (снижается концентрация CO). При увеличении P выше 1,0–2,0 МПа степень использования химической энергии газа увеличивается слабо, однако требуется применение сверхпрочных материалов и специальных уплотнений для герметизации тракта, что также снижает экономичность процесса.

На основе данных газодинамического моделирования в системе "восходящий газ — падающие частицы ЖРМ" установлено, что наиболее оптимально дополнительный газ подавать тангенциально потоку отходящего газа. При этом создается вихревая зона интенсивного межфазного теплообмена между частицами ЖРМ, дополнительным газом и восходящим из расплава газом, увеличивается время пребывания частиц ЖРМ в газовой фазе. Это позволяет выполнить агрегат более компактным (меньшей высоты) и повысить экономичность процесса.

При подаче шлакообразующих материалов совместно с ЖРМ упрощается конструкция агрегата и управление процессом, т.к. не требуется дополнительных устройств для подачи шлакообразующих материалов. Кроме того, увеличивается степень использования физической теплоты отходящих газов за счет охлаждающего действия на газ шлакообразующих материалов, повышается степень усвоения шлакообразующих материалов за счет их предварительного подогрева до попадания в расплав.

Для регулирования состава и расхода дополнительного кислородсодержащего газа требуется подача в кислородсодержащий газ газа-разбавителя. В качестве последнего может использоваться отходящий из агрегата газ, имеющий невысокий окислительный потенциал (рециркуляция отходящего газа). Это приводит к снижению общего расхода энергоносителей в процессе и повышает экономичность последнего.

Таблица 1

№ п/п	Вариант процесса	Степень восста- новления газом q_r , %	Параметры отходяще- го из реактора газа		Удельный расход энергии, ГДж/т	Удельный расход ус- ловного топлива, кг/т
			t , °C	CO, %		
1	Доменный процесс*	97**	400	25	22	748
2	Прототип	70	300	34	21	714
3	Предлагаемый способ	3	600	15	22	743
4	-"	5	450	8	20	680
5	-"	20	380	6	18	578
6	-"	40	340	12	20	680
7	-"	50	320	27	21	714
8	-"	60	310	35	22	748

* В затраты энергии включены также затраты на производство агломерата, кокса и собственно доменный процесс, т.е. все затраты энергии, необходимые для превращения ЖРМ в продукт (железоуглеродистый расплав: $t = 1300^\circ\text{C}$; %C = 4%);

** Степень восстановления ЖРМ газом в шахте доменной печи (до попадания ЖРМ в жидкий шлак), в том числе газом, восходящим из горна расплава доменной печи, и газом, полученным в результате газификации кокса в шахте.

Таблица 2

№ п/п	Температура газа на уровне подачи до- полнительного газа, К	Содержание активного кислорода в от- ходящем из реактора газе (сверх термо- динамически равновесного), %
1	600	Более 10
2	700	2-5
3	800	В пределах термодинамического равно- весия газовой фазы
4	1000	-"

Таблица 3

№ п/п	Давление в газовой фазе, МПа	Содержание CO в отходящем из реакто- ра газе, %
1	0.09	9
2	0.1	9
3	0.2	6
4	1.0	4
5	2.0	3



УКРАЇНА

(19) UA (11) 21710 (13) A

(51)6 C 21 B 13/00

ДЕРЖАВНЕ
ПАТЕНТНЕ
ВІДМОВСТВООПИС ДО ПАТЕНТУ
НА ВІНАХІДБез проведення експертизи по суті
на підставі Постанови Верховної Ради України
№ 3769-XII від 23 XII. 1993 р.Публікується
в редакції заявника

(54) СПОСІБ ОДЕРЖАННЯ ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВОГО РОЗПЛАВУ

1

2

(21) 95073085

(22) 03.07.95

(24) 20.01.98

(46) 30.04.98. Бюл. № 2

(47) 20.01.98

(56) 1. Авторское свидетельство СССР
№ 1363858, кл. C 21 B 13/00.2. Авторское свидетельство СССР
№ 1608226, кл. C 21 B 13/00.3. Итоги науки и техники (ВИНИТИ).
Сер. "Производство чугуна и стали", 1984,
т. 15, с. 91-92.(72) Капустін Євгеній Олександрович, Сущенко
Андрій Вікторович, Капустін Олексій
Євгеньович, Логозинська Вікторія Миколаївна
(73) Приазовський державний технічний
університет(57) 1. Способ получения железоуглероди-
стого расплава, содержащий загрузку свер-
ху железорудных материалов, нагрев их и
частичное восстановление отходящим га-
зом, дальнейший нагрев, плавление и окон-
чательное восстановление в расплаве,
вдувание в расплав с газом-носителем угле-
родсодержащих материалов, загрузку шла-
кообразующих материалов и выпуск жидких
металла и шлака, отличающийся тем,
что в движущийся в противотоке к железо-
рудному материалу отходящий из расплава
газ выше уровня жидкого металла подают
дополнительный кислородсодержащий газ,
обеспечивая степень восстановления желе-
зорудных материалов в газовой фазе от 5 до
40%.2. Способ по п. 1, отличающийся
тем, что степень восстановления железоруд-
ных материалов в газовой фазе регулируют
составом и удельным расходом дополни-тельного кислородсодержащего газа, изме-
няя его в пределах

$$0,3[(1 - 0,02q_r) - k_1(1 - 0,01q_r)]/\eta_0 \leq$$

$$\leq m_g \leq [232k_2k_3(F_{m.g.}/G) \cdot$$

$$\cdot (P/T_{m.g.} \cdot \rho_4 d_4)^{1/2} -$$

$$- (m_{и.ж.} + 1,56k_2k_4m_{о.ж.})/(1 - \eta_0),$$

где m_g – удельный расход дополнительного
кислородсодержащего газа, кг/кг Fe_2O_3 же-
лезорудных материалов; q_r – степень восстановления железоруд-
ных материалов (ЖРМ) в газовой фазе, %; η_0 – массовая доля кислорода в допол-
нительном кислородсодержащем газе; G – расход ЖРМ (в пересчете через Fe_2O_3
ЖРМ), кг/с (производительность агрегата); P – давление в газовой фазе, МПа; $F_{m.g.}$, $T_{m.g.}$ – площадь минимального по-
перечного сечения противоточного столба от-
ходящего газа и ЖРМ (выше уровня подачи
дополнительного кислородсодержащего га-
за), м и температура газа в этом сечении, К; ρ_4 , d_4 – плотность и минимальный диа-
метр частиц загружаемого ЖРМ, кг/м³ и м; $m_{и.ж.}$ – удельный расход инертных и ней-
тральных газов, вдуваемых в жидкий металл,
кг/кг Fe_2O_3 ЖРМ; $m_{о.ж.}$ – удельный расход активного кис-
лорода, вдуваемого в жидкий металл, кг/кг
 Fe_2O_3 ЖРМ; k_1 – коэффициент, учитывающий окисле-
ние выделяющегося из расплава газа при
прохождении его через металл и шлак, рав-
ный 0,05–0,20;

(19) UA (11) 21710 (13) A

k_2 — коэффициент, учитывающий отклонение состава газа, равный 0,9–1,1;

k_3 — коэффициент, учитывающий отклонение геометрических размеров системы, равный 0,9–1,1;

k_4 — коэффициент, учитывающий степень использования кислорода, вдуваемого в жидкий металл, на окисление углерода, равный 0,8–1,0.

3. Способ по п. 1, отличающийся тем, что дополнительный кислородсодержащий газ подают на высоте H от уровня жидкого металла, причем $H < H_{\max}$, где H_{\max} — высота по потоку отходящего газа, где температура последнего составляет 700 К.

Изобретение относится к металлургии, к области бескоксового (бездоменного) получения железа из железорудных материалов.

Известен способ получения стали или чугуна [1], включающий подачу в железоуглеродистый расплав под уровень в потоке газа предварительно нагретого (до 1590–1760°C) измельченного железорудного концентрата со скоростью 0,5–1,5 м и углеродсодержащего материала.

Для реализации известного способа необходимо осуществление предварительного нагрева до высоких температур железорудного концентрата и углеродсодержащего материала, что приводит к высоким затратам энергии. Кроме того, выделяющиеся из расплава в больших количествах газы, состоящие преимущественно из СО (оксида углерода) и обладающие высокой физической ($t = 1300$ – 1700°C) и химической $Q_{\text{н}}^{\text{P}} = 10$ – 16 МДж/м³ теплотой, не используются непосредственно в процессе. Это не позволяет получить высокую экономичность (высокий энергетический КПД и низкий удельный расход топлива) процесса и усложняет его реализацию (необходимость применения плазмотрона, транспорт высокотемпературных двухфазных сред и т.д.).

Известен способ восстановления железорудного сырья в жидкой шлаковой ванне [2], включающий подачу железорудного концентрата или аглоруды, флюса и угля, сжигание угля в слое шлака подачей кислородсодержащего газа, дожигание выделяющейся окиси углерода и непрерывный выпуск жидких продуктов плавки, причем интенсивность подачи угля поддерживается в пределах 0,2–5,0 т/час на

4. Способ по п. 1, отличающийся тем, что давление в потоке отходящего газа поддерживают в пределах 0,1–2,0 МПа.

5. Способ по п. 1, отличающийся тем, что дополнительный кислородсодержащий газ подают тангенциально потоку отходящего газа.

6. Способ по п. 1, отличающийся тем, что шлакообразующие материалы подают совместно с железорудными материалами.

7. Способ по п. 1, отличающийся тем, что регулирование состава и расхода дополнительного кислородсодержащего газа осуществляют посредством рециркуляции отходящего газа.

1 м² площади расплава, а кислородом дутья сжигают 8–50% угля.

В известном способе отходящие из ванны газы дожигаются над ней кислородом с выделением большого количества теплоты. Однако лишь часть ее (до 50%) передается расплаву (полезно используется), остальная — выбрасывается из агрегата вместе с высокотемпературными (1200–1600°C) газами. Это не позволяет получить высокую экономичность процесса (высокий энергетический КПД и низкий удельный расход топлива). Кроме того, восстановление железорудных материалов в известном способе осуществляется преимущественно в шлаке твердофазным углеродом (угля), что не позволяет получить высокую скорость восстановления, т.е. высокую производительность процесса.

Наиболее близким по технической сущности и достигаемому результату к предлагаемому является способ получения железоуглеродистого расплава С01N (ФРГ) [3] — прототип, включающий загрузку сверху железорудных материалов в восстановительную шахтную печь, нагрев их и частичное восстановление в этой печи газом, отходящим из плавильной печи, подачу предварительно восстановленных железорудных материалов в плавильную печь, дальнейший их нагрев, плавление и окончательное жидкофазное восстановление в расплаве, вдувание в расплав твердого углеродсодержащего материала (угля) вместе с газом-носителем, охлаждение выходящего из плавильной печи горячего газа до 1000°C, смешивание его с рециркулирующим колошниковым газом, пропуск его через циклон и подачу в восстановительную

печь, отмывку отходящего из восстановительной печи газа от CO_2 , дополнительный подогрев его и частичную выдачу на сторону (внешнему потребителю) и рециркуляцию в процессе, загрузку шлакообразующих материалов в плавильную печь, периодический выпуск жидких металла и шлака, а также поддержание избыточного давления газа в плавильной печи.

При реализации известного способа физическая и химическая теплота отходящего из расплава газа используется на нагрев и частичное восстановление железорудного материала в шахтной восстановительной печи. Однако из-за отсутствия дожигания газа, химическая энергия его в этой печи используется не полностью (в отходящих газах содержится большое количество CO). Это "привязывает" работу агрегата к "внешнему потребителю" энергии и не позволяет получить высокую экономичность процесса. Кроме того, степень газового восстановления железорудных материалов в известном способе составляет более 60%. Это приводит к дополнительному расходу топлива (углеродсодержащих материалов на получение дополнительного количества восстановительного газа) и также не позволяет получить высокую экономичность процесса. При этом отсутствует возможность регулирования степени газового (твердофазного) и степени жидкофазного восстановления железорудных материалов в процессе, что также снижает экономичность способа.

При реализации известного способа восстановление железорудных материалов осуществляется преимущественно в твердофазном состоянии восстановительным газом. Это не позволяет достичь высокие скорости восстановления и удельную производительность агрегата. Кроме того, сложная схема организации газового тракта в известном способе (наличие систем охлаждения и подогрева газа, отмывки от CO и др.) не позволяет обеспечить его простую и надежную организацию и управление.

В основу изобретения поставлена задача усовершенствовать способ получения железуглеродистого расплава, в котором за счет введения нового действия и условий его выполнения достигается более полное использование химической и физической теплоты отходящих из расплава газов в основном процессе и возможность регулирования степеней газового и жидкофазного восстановления железорудных материалов, повышается их скорость восстановления и упрощается схема организации газового тракта, что приводит к повышению эконо-

мичности способа (снижению удельного расхода топлива), повышению производительности, а также упрощению его реализации и управления.

Для решения поставленной задачи в способе получения железуглеродистого расплава, содержащем загрузку сверху железорудных материалов, нагрев их и частичное восстановление отходящим газом, дальнейший нагрев, плавление и окончательное восстановление в расплаве, вдувание в расплав с газом-носителем углеродсодержащих материалов, загрузку шлакообразующих материалов и выпуск жидких металлов и шлака, в движущийся в противотоке к железорудному материалу, отходящий из расплава газ, выше уровня жидкого металла, подают дополнительный кислородсодержащий газ, обеспечивая степень восстановления железорудных материалов в газовой фазе от 5 до 40%. При этом степень восстановления железорудных материалов в газовой фазе регулируют составом и удельным расходом дополнительного кислородсодержащего газа, изменяя его в пределах

$$0,3[(1 - 0,02q_r) - k_1(1 - 0,01q_r)]/\eta_0 \leq$$

$$\leq m_g \leq [232k_2k_3(F_{m,r}/G) \cdot$$

$$\cdot (P/T_{m,r} \cdot \rho_4 d_4)^{1/2} -$$

$$- (m_{и,ж} + 1,56k_2k_4m_{о,ж})/(1 - \eta_0),$$

где m_g — удельный расход дополнительного кислородсодержащего газа, кг/кг Fe_2O_3 железорудных материалов;

q_r — степень восстановления железорудных материалов (ЖРМ) в газовой фазе, %;

η_0 — массовая доля кислорода в дополнительном кислородсодержащем газе;

G — расход ЖРМ (в пересчете через Fe_2O_3 ЖРМ), кг/с (производительность агрегата);

P — давление в газовой фазе, МПа;

$F_{m,r}$, $T_{m,r}$ — площадь минимального поперечного сечения противоточного столба отходящего газа и ЖРМ (выше уровня подачи дополнительного кислородсодержащего газа), м и температура газа в этом сечении, К;

ρ_4 , d_4 — плотность и минимальный диаметр частиц загружаемого ЖРМ, кг/м³ и м;

$m_{и,ж}$ — удельный расход инертных и нейтральных газов, вдуваемых в жидкий металл, кг/кг Fe_2O_3 ЖРМ,

$m_{о,ж}$ — удельный расход активного кислорода, вдуваемого в жидкий металл, кг/кг Fe_2O_3 ЖРМ,

k_1 — коэффициент, учитывающий окисление выделяющегося из расплава газа при прохождении его через металл и шлак, равный 0,05–0,20;

k_2 — коэффициент, учитывающий отклонение состава газа, равный 0,9–1,1;

k_3 — коэффициент, учитывающий отклонение геометрических размеров системы, равный 0,9–1,1;

k_4 — коэффициент, учитывающий степень использования кислорода, вдуваемого в жидкий металл, на окисление углерода, равный 0,8–1,0.

Кроме того, дополнительный кислородсодержащий газ подают на высоте H от уровня жидкого металла, причем $H < H_{\max}$, где H_{\max} — высота по потоку отходящего газа, где температура последнего составляет 700 К. Кроме того, давление в потоке отходящего газа поддерживается в пределах 0,1–2,0 МПа. Кроме того, дополнительный кислородсодержащий газ подают тангенциально потоку отходящего газа в виде вихревого потока. Кроме того, шлакообразующие материалы подают совместно с железорудными материалами. Кроме того, дополнительный кислородсодержащий газ подают совместно с железорудными материалами. Кроме того, регулирование расхода и состава дополнительного кислородсодержащего газа осуществляют посредством рециркуляции отходящего газа.

Подача дополнительного кислородсодержащего газа в движущийся в противоток к железорудному материалу отходящий из расплава газ, выше уровня металлического расплава, позволяет частично дожигать СО и Н в отходящем газе с выделением теплоты (превращение химической теплоты в физическую), остальная часть химического потенциала отходящих газов расходуется на эндотермические реакции восстановления ЖРМ в твердофазном состоянии. При этом повышается степень использования физической и химической теплоты отходящих газов в процессе. Изменение количества дожигаемого газа приводит к изменению соотношения степеней газового и жидкофазного восстановления ЖРМ в процессе. При степени газового (твердофазного) восстановления ЖРМ (q_r), изменяющейся в пределах от 5 до 40% за счет оптимального перераспределения химической энергии образующегося в расплаве газа между процессами предварительного нагрева и восстановления ЖРМ достигается минимальный расход топлива в процессе, т.е. максимальная экономичность последнего. При этом восстановление ЖРМ осуществляется преимущественно в жидкой фазе растворенным в ме-

талле углеродом, что обеспечивает высокие скорость восстановления и производительность процесса. При $q_r < 5\%$ резко увеличивается температура отходящих из агрегата газов (неполное использование физической теплоты отходящего газа), что снижает экономичность процесса. При $q_r > 40\%$ снижается скорость восстановления ЖРМ и резко возрастает расход топлива. Это происходит из-за того, что часть необходимого для обеспечения заданной величины q_r СО при этом образуется не по реакциям взаимодействия углерода расплава с оксидами железа ЖРМ, а в результате окисления углерода расплава кислородом. При этом также перерасходуется и кислород. Это приводит к снижению экономичности процесса в целом и снижению его производительности. Кроме того, при указанной организации процесса исключается необходимость в дополнительных системах подогрева, охлаждения и отмычки от СО отходящих газов, что позволяет упростить организацию газового тракта и конструкцию агрегата (совместить обе печи в одной), а следовательно, упростить реализацию и управление процессом в целом.

Регулирование параметра q_r при этом наиболее просто и надежно технически осуществляется изменением состава расхода дополнительного кислородсодержащего газа. При изменении удельного расхода дополнительного кислородсодержащего газа в указанных пределах обеспечивается одновременно заданная величина q_r и равномерное движение противоточного столба отходящих газов и ЖРМ. При значениях m_g менее указанного нижнего предела поступающего дополнительного газа недостаточно для заданной степени газового восстановления q_r (величина q_r становится больше заданной), а при значениях m_g более указанного верхнего предела начинается "запирание" схода ЖРМ и сильный вынос мелких фракций ЖРМ с отходящим газом из агрегата.

Подача дополнительного кислородсодержащего газа ниже уровня металлического расплава неэффективна, т.к. при этом практически весь кислород газа используется на окисление металла. При подаче дополнительного газа на высоте $H < H_{\max}$ от уровня жидкого металла, где H_{\max} — высота по потоку отходящего газа с температурой последнего 700 К, обеспечивается практически полное (до термодинамического равновесия) усвоения его в процессе (на окисление СО и Н₂). При $H < H_{\max}$ из-за недостаточной температуры резко замедляются химические реакции в газовой фазе и наблюдается неполное усвоение кислорода

дополнительного газа (частичный выход его вместе с отходящими газами из агрегата).

Поддержание давления в потоке отходящего газа в пределах 0,1–2,0 МПа позволяет повысить экономичность и производительность способа за счет увеличения полноты протекания реакций образования CO_2 (повышения термодинамически равновесного содержания CO_2 в отходящих из агрегата газах) и скорости протекания тепломассообменных процессов. При $P < 0,1$ МПа возникает опасность подсосов в газовый тракт окружающего воздуха, что приводит к дополнительным затратам теплоты и снижает экономичность способа. При $P > 2,0$ МПа резко снижается надежность работы высокотемпературных узлов агрегата, возникает необходимость в использовании специальных дорогих сверхпрочных материалов, что также снижает экономичность процесса.

Подача дополнительного кислородсодержащего газа тангенциально потоку отходящего из расплава газа позволяет организовать вихревую зону интенсивного тепломассообмена между отходящим газом, дополнительным газом и частицами ЖРМ, увеличить время пребывания частиц ЖРМ в газовой фазе агрегата. Это, в свою очередь, позволяет уменьшить рабочую высоту газового столба (выполнить агрегат для реализации способа более компактным), снизить удельные капитальные затраты и, в конечном итоге, повысить экономичность способа.

Подача шлакообразующих материалов совместно с ЖРМ позволяет обеспечить их предварительный прогрев отходящим газом. В результате этого, с одной стороны, повышается скорость реакций шлакообразования и более полно усваиваются (экономятся) шлакообразующие материалы, а с другой – снижается температура отходящего газа (более полно реализуется физическая теплота отходящего газа в процессе). Повышается экономичность процесса в целом. Кроме того, появляется возможность отказаться от использования дополнительных печей для термической обработки шлакообразующих материалов (например, печей для обжига известняка и получения извести) и проводить эту обработку непосредственно в рамках этого способа. Регулирование расхода и состава дополнительного кислородсодержащего газа посредством рециркуляции отходящего газа в процессе позволяет уменьшить потребление дополнительных газов (энергоносителей) и тем самым повысить экономичность способа.

Способ осуществляется в реакторе 1 (см. чертеж), по высоте которого расположены

устройства для ввода реагентов и вывода продуктов реакций. В верхней части реактора расположены устройства 2 для ввода ЖРМ. Ниже расположены устройства 3 для ввода дополнительного кислородсодержащего газа. В нижней части реактора расположены устройства: 4 – для вдувания в расплав дополнительного углеродсодержащего материала, 5 – для отвода жидкого металла (железоуглеродистого расплава) и 6 – для отвода жидкого шлака. Загружаемый в реактор 1 через устройства 2 ЖРМ – 7 движется вниз в противотоке с восходящим газом 8, образующимся в расплаве – 9 и имеющим на выходе из него высокий физический (t 1250–1650°C) и химический (80–90% CO , $Q_{\text{н.р.}} = 10\text{--}16$ МДж/м³) потенциал. Вдуваемый через устройства 3, находящиеся выше уровня металлического расплава, дополнительный кислородсодержащий газ – 10 реагирует с оксидом углерода (CO) отходящего газа. При этом химическая энергия отходящего газа превращается в тепловую. Физическая теплота отходящего газа используется на нагрев ЖРМ, а оставшаяся химическая энергия – на частичное восстановление ЖРМ в газовой фазе реактора (до попадания их в расплав). Расход и состав дополнительного кислородсодержащего газа устанавливают таким образом, чтобы степень восстановления ЖРМ в газовой фазе находилась в диапазоне 5–40%. При этом наиболее оптимальным способом ввода дополнительного кислородсодержащего газа – 10 является подача его тангенциально к направлению движения отходящего газа – 8, в виде вихревого потока, что обеспечивает образование вихревой зоны интенсивного тепломассообмена между отходящим газом – 8, дополнительным газом – 10 и ЖРМ – 7. Подача дополнительного газа 10 может осуществляться на нескольких уровнях. Высота на которой обеспечивается ввод дополнительного газа 10 (от уровня металлического расплава) находится на расстоянии $H < H_{\text{max}}$, где H_{max} – высота, где температура отходящего газа – 8 (контролируется одним из известных устройств, например, отсасывающей термопарой) меньше 700 К.

Нагретые и частично восстановленные ЖРМ попадают в расплав 9, состоящий из жидкого шлака 11 и жидкого металла (железоуглеродистого расплава) – 12, где они дополнительно нагреваются, расплавляются и окончательно восстанавливаются (до $q_r = 100\%$) в жидкофазном состоянии преимущественно углеродом, растворенным в железоуглеродистом расплаве 12 с высокой скоростью. При этом выделяется большое количество газа, содержащего до 80–95%

СО, который непрерывно отходит из расплава восходящим потоком. Для обеспечения непрерывности протекания процесса в расплаве 12 через устройства 4 вдувают углеродсодержащий материал — 13 в потоке газа-носителя. В качестве газа-носителя используют инертный, нейтральный или кислородсодержащий газ. Наиболее оптимальное содержание кислорода в нем находится в пределах от 10 до 20% (для предотвращения "замораживания" зоны вдувания углеродсодержащего материала в расплав). Восстановленное железо из ЖРМ переходит в металлический расплав, примеси ЖРМ и углеродсодержащего материала — в газовую фазу и шлак. Для формирования активного рафинирующего шлака в ванну подаются шлакообразующие материалы — 14 (известь, известняк, плавиковый шпат, бокситы и др.) Наиболее оптимально подача шлакообразующих материалов осуществляется через устройства 2 совместно с ЖРМ. При этом шлакообразующие материалы — 14, проходя через газовую фазу 8 реактора, дополнительно прогреваются и охлаждают отходящий газ 8. Для поддержания необходимого уровня жидкого металла 12 и жидкого шлака 11 в агрегате 1 через устройства 5 и 6 непрерывно или периодически отводят жидкие металл 12 и шлак 11. Давление газов в агрегате поддерживается в диапазоне 0,1–2,0 МПа (регулирование его осуществляется известным устройством, например, шибером на выходе из агрегата). Отходящий из реактора 1 газ 8 подают на очистку и "сбрасывают" в атмосферу без дожигания на "свече", т.к. он содержит СО в малых количествах. При этом наиболее целесообразно часть этого газа после очистки использовать для разбавления кислорода дополнительного газа 10, а также в качестве газа-носителя углеродсодержащего материала 13. Изменяя соотношение подаваемых количеств ЖРМ и углеродсодержащего материала в реактор получают продукт (железоуглеродистый расплав) с содержанием углерода от 0,1 до 4%.

В табл. 1 приведены данные численного эксперимента, проведенного с использованием ПЭВМ по влиянию степени восстановления ЖРМ в газовой фазе (q_r) на физический потенциал (температуру) и химический потенциал (содержание СО) отходящего из реактора газа, а также на удельный расход энергии (ГДж/т продукта) и удельный расход условного энергетического ($Q_{н.р} = 29,4$ МДж/кг) топлива (кг/т продукта) в процессе (при условии, что продукт — железоуглеродистый расплав имеет температуру на выпуске 1300°C и содержание уг-

лерода — 4%). В табл. 1 также приведены аналогичные данные для прототипа и доменного процесса.

Как видно из табл. 1, наиболее оптимальный диапазон величины q находится в пределах от 5 до 40%. При $q < 5\%$ удельный расход топлива резко увеличивается из-за неполного использования физической теплоты отходящего газа. Из-за увеличения его температуры снижается также степень доокисления СО до СО₂, т.е. снижается и использование химической энергии отходящего газа в процессе. При $q > 40\%$ расход топлива увеличивается до значений прототипа из-за необходимости дополнительного ввода углеродсодержащего материала на выработку восстановительного газа, а также из-за снижения степени использования химической теплоты отходящего газа.

Исходя из физических условий протекания процесса: на основе термодинамических зависимостей взаимодействия ЖРМ с газовой фазой в агрегате, а также на основе газодинамических зависимостей взаимодействия восходящего газового потока с "падающими" частицами ЖРМ, установлено, что удельный расход дополнительного кислородсодержащего газа (кг/кг Fe₂O₃ ЖРМ) должен находиться в диапазоне

$$0,3[(1 - 0,02q_r) - k_1(1 - 0,01q_r)]/\eta_0 \leq$$

$$\leq m_g \leq [232k_2k_3(F_{м.г.}/G) \cdot$$

$$\cdot (P/T_{м.г.} \cdot \rho_4 d_4)^{1/2} -$$

$$- (m_{и.ж.} + 1,56k_2k_4m_{о.ж.})/(1 - \eta_0),$$

где q_r — степень восстановления железорудных материалов (ЖРМ) в газовой фазе, %;

η_0 — массовая доля кислорода в дополнительном кислородсодержащем газе;

G — расход ЖРМ (в пересчете через Fe₂O₃ ЖРМ), кг/с (производительность агрегата);

P — давление в газовой фазе, МПа;

$F_{м.г.}, T_{м.г.}$ — площадь минимального поперечного сечения противоточного столба отходящего газа и ЖРМ (выше уровня подачи дополнительного кислородсодержащего газа), м и температура газа в этом сечении, К;

ρ_4, d_4 — плотность и минимальный диаметр частиц загружаемого ЖРМ, кг/м³ и м;

$m_{и.ж.}$ — удельный расход инертных и нейтральных газов, вдуваемых в жидкий металл, кг/кг Fe₂O₃ ЖРМ;

$m_{о.ж.}$ — удельный расход активного кислорода, вдуваемого в жидкий металл, кг/кг Fe₂O₃ ЖРМ;

k_1 — коэффициент, учитывающий окисление выделяющегося из расплава газа при прохождении его через металл и шлак, равный 0,05–0,20;

k_2 — коэффициент, учитывающий отклонение состава газа, равный 0,9–1,1;

k_3 — коэффициент, учитывающий отклонение геометрических размеров системы, равный 0,9–1,1;

k_4 — коэффициент, учитывающий степень использования кислорода, вдуваемого в жидкий металл, на окисление углерода, равный 0,8–1,0.

При значениях удельного расхода кислородсодержащего газа m меньше нижнего предела, определяемого из приведенного выше выражения, не достигается заданная степень восстановления ЖРМ в газовой фазе из-за недостатка активного кислорода в последней, при значениях m больше верхнего предела наблюдается "запирание" схода ЖРМ, нарушается стабильность процесса, появляется вынос мелких фракций частиц ЖРМ с отходящим из реактора газом. В обоих случаях резко снижается экономичность процесса.

В табл. 2 приведено влияние температуры газа (по высоте H над уровнем жидкого расплава) на наличие непрореагировавшего активного кислорода в отходящем из реактора газе.

Как видно из табл. 2, подача дополнительного газа на высоте свыше H_{\max} от уровня металлического расплава, где H_{\max} — высота газового потока с температурой последнего 700 К, нецелесообразна, т.к. это приводит к резкому увеличению степени неусвоения активного кислорода дополнительного газа и приводит к снижению экономичности процесса. Подача дополнительного газа ниже уровня металлического расплава неэффективна по причине взаимодействия активного кислорода в этом случае не с монооксидом углерода, а с железоуглеродистым расплавом.

В табл. 3 приведены данные численного моделирования на ЭВМ по влиянию давления в потоке отходящего газа на использование его химического потенциала в процессе (на содержание CO , %).

При давлении в газовой фазе агрегата $P < 0,1$ МПа возможны подсосы окружающего воздуха через неплотности тракта, что приводит к попаданию азота и снижению экономичности процесса. С увеличением P увеличивается степень использования химической энергии отходящего из расплава газа (снижается концентрация CO). При увеличении P выше 1,0–2,0 МПа степень использования химической энергии газа увеличивается слабо, однако требуется применение сверхпрочных материалов и специальных уплотнений для герметизации тракта, что также снижает экономичность процесса.

На основе данных газодинамического моделирования в системе "восходящий газ — падающие частицы ЖРМ" установлено, что наиболее оптимально дополнительный газ подавать тангенциально потоку отходящего газа. При этом создается вихревая зона интенсивного межфазного теплообмена между частицами ЖРМ, дополнительным газом и восходящим из расплава газом, увеличивается время пребывания частиц ЖРМ в газовой фазе. Это позволяет выполнить агрегат более компактным (меньшей высоты) и повысить экономичность процесса.

При подаче шлакообразующих материалов совместно с ЖРМ упрощается конструкция агрегата и управление процессом, т.к. не требуется дополнительных устройств для подачи шлакообразующих материалов. Кроме того, увеличивается степень использования физической теплоты отходящих газов за счет охлаждающего действия на газ шлакообразующих материалов, повышается степень усвоения шлакообразующих материалов за счет их предварительного подогрева до попадания в расплав.

Для регулирования состава и расхода дополнительного кислородсодержащего газа требуется подача в кислородсодержащий газ газа-разбавителя. В качестве последнего может использоваться отходящий из агрегата газ, имеющий невысокий окислительный потенциал (рециркуляция отходящего газа). Это приводит к снижению общего расхода энергоносителей в процессе и повышает экономичность последнего.

Таблица 1

№ п/п	Вариант процесса	Степень восста- новления газом α , %	Параметры отходяще- го из реактора газа		Удельный расход энергии, ГДж/т	Удельный расход ус- ловного топлива, кг/т
			t , °C	CO, %		
1	Доменный процесс*	97**	400	25	22	748
2	Прототип	70	300	34	21	714
3	Предлагаемый способ	3	600	15	22	743
4	—	5	450	8	20	680
5	—	20	380	6	18	578
6	—	40	340	12	20	680
7	—	50	320	27	21	714
8	—	60	310	35	22	748

* В затраты энергии включены также затраты на производство агломерата, кокса и собственно доменный процесс, т.е. все затраты энергии, необходимые для превращения ЖРМ в продукт (железоуглеродистый расплав, $t = 1300^\circ\text{C}$; %C = 4%);

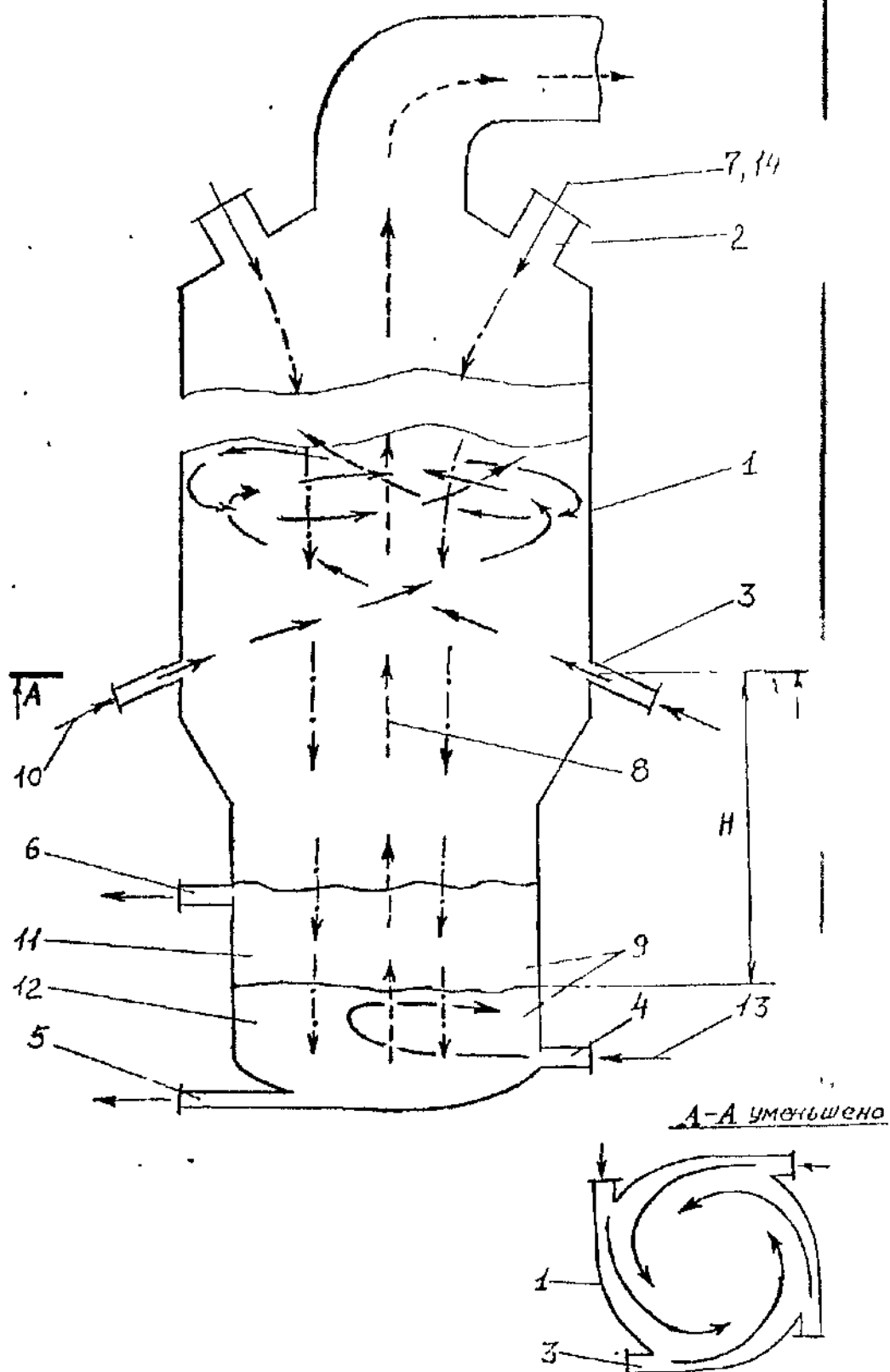
** Степень восстановления ЖРМ газом в шахте доменной печи (до попадания ЖРМ в жидкий шлак), в том числе газом, восходящим из горна расплава доменной печи, и газом, полученным в результате газификации кокса в шахте

Таблица 2

№ п/п	Температура газа на уровне подачи до- полнительного газа, К	Содержание активного кислорода в от- ходящем из реактора газе (сверх термо- динамически равновесного), %
1	600	Более 10
2	700	2-5
3	800	В пределах термодинамического равно- весия газовой фазы
4	1000	—

Таблица 3

№ п/п	Давление в газовой фазе, МПа	Содержание CO в отходящем из реакто- ра газе, %
1	0.09	9
2	0.1	9
3	0.2	6
4	1.0	4
5	2.0	3



Упорядник

Техред М.Келемеш

Коректор О. Кравцова

Замовлення 4450

Тираж

Підписне

Державне патентне відомство України,
254655, ГСП, Київ-53, Львівська пл., 8

Відкрите акціонерне товариство "Патент", м. Ужгород, вул Гагаріна, 101

