

## НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПЛАЗМА В ПРОЦЕССАХ ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

В. И. Бородин

*Петрозаводский государственный университет*

В сфере развития современной техники и технологии наблюдается все более широкое использование высоких параметров технологических процессов: температуры, скорости, времени контакта и т. д. Обусловлено это, в основном, следующими факторами развития цивилизации в последние десятилетия.

С одной стороны, основные производства, обеспечивающие человечество традиционными многотоннажными продуктами (энергонасителями, металлами, пластмассами и др.) сформировались, в основном, на базе научных концепций XIX, начала XX веков или еще более раннего времени (например, металлургия) и обладают рядом недостатков, связанных с многостадийностью, громоздкостью, расточительностью по энергии и ресурсам, а также большими отходами. Большинство технологий в рамках традиционных подходов достигли своего критического состояния.

Дальнейшее развитие промышленной базы с использованием таких подходов невозможно, так как влечет за собой необоснованное наращивание объема отдельных производств, неоправданных затрат ресурсов для создания производственных площадок и оборудования, быстрого истощения полезных ископаемых, существенного ухудшения экологической обстановки.

С другой стороны, во второй половине XX века началось бурное развитие новых отраслей (атомной промышленности, реактивной техники, электроники и др.), что потребовало качественного улучшения традиционно используемых материалов, а также создания новых материалов, уникальных по своим свойствам (чистоте, термической и химической стойкости, твердости и т. д.).

Все это предопределило интенсивную работу по поиску и разработке новых технологических решений в металлургии, химической промышленности, энергетике, машиностроении, электронике и др.

Одним из путей решения данных проблем является существенное повышение температуры, при которой реализуется тот или иной технологический процесс. Указанные причины привели к возникновению и развитию нового направления физической химии и химической технологии – *плазмохимии (ПХ)*, где осуществление химических реакций происходит в высокотемпературной среде плазмы или созданной при помощи плазмы.

В результате, в среде за счет повышения температуры  $T$  значительно повышаются скорости химических реакций  $w$ , поскольку по формуле Аррениуса  $w \sim \exp(-E_a/T)$ .

Кроме того, в плазме, из-за появления высокорореакционных частиц и излучения возникают физико-химические взаимодействия, которые могут приводить к образованию новых соединений, не образующихся в обычном (низкотемпературном) состоянии (например, соединений из инертных газов). Более того, традиционные химические продукты, полученные с помощью ПХ технологий, часто отличаются по своим свойствам от тех же продуктов, но полученных при обычных температурах.

В зависимости от свойств плазмообразующей среды и условий реализации разряда состояние плазмы может иметь существенное различие. В частности, состояние плазмы может быть достаточно близким к состоянию термодинамического равновесия (квазиравновесие), а может быть далеким от него (неравновесная плазма). Поэтому ПХ системы иногда условно разделяют на два больших класса – неравновесные и квазиравновесные.

Состояние *квазиравновесной плазмы*, характеризующееся одной температурой, можно достаточно точно описывать с помощью равновесной термодинамики (ТД) и статистической физики. Это позволяет предсказать и рассчитать различные параметры, а также продукты химических процессов, которые образуются в такой плазме, не вдаваясь в

суть происходящих элементарных явлений, которые в данном случае описываются классической равновесной химической кинетикой.

Гораздо более богатой по реакционным возможностям является **неравновесная плазма**, которую нельзя характеризовать одной температурой. В такой плазме каждый сорт частиц и его состояние можно характеризовать своей температурой (например, температура электронов, температура ионов, вращательная температура, колебательная температура, температура заселения и др.). При этом надо отметить, что здесь «температура» не является истиной термодинамической температурой, а является просто удобным параметром, позволяющим использовать при расчетах известные статистические функции распределения (функции Максвелла, Больцмана, Саха, Планка и др.) для соответствующего рода частиц. Эти температуры могут сильно отличаться друг от друга. Например, в разряде низкого давления температура электронов (десятки тысяч градусов) может быть в сотни раз больше температуры атомов и ионов (сотни градусов). В неравновесной плазме можно получить самые экзотические продукты (например, различные соединения инертных газов).

Как правило, неравновесная плазма получается при низких давлениях плазмообразующей среды ( $P \leq 100$  мм рт. ст.) и небольших токах, а квазиравновесная – при высоких давлениях ( $P \geq 1$  атм).

Для получения газоразрядной плазмы используют все виды электромагнитных полей: постоянное, переменное, высокочастотное (ВЧ), сверхвысокочастотное (СВЧ), оптическое излучение и т. д.

При **ПХ переработке материалов** все исходное вещество (а не только его поверхность) проходит стадию высокотемпературного состояния, обусловленного взаимодействием с плазмой. **Из-за необходимости иметь высокую производительность в многотоннажных технологиях используется, как правило, квазиравновесная плазма** при высоком давлении, которая получается в специальных устройствах – генераторах плазмы (плазмотронах). В результате здесь не используются преимущества неравновесной плазмы, а плазма является просто тепловым источником.

Однако в отличие от других тепловых источников (например, от источников сгорания) плазменный тепловой источник обладает следующими преимуществами: высокими температурами (вплоть до 50000 К), высокими удельными концентрациями энергии (энтальпии) и возможностью использования любого химического состава газовой среды.

Схема организации ПХ переработки материалов приведена на рис. 1. Перед тем, как попасть в ПХ реактор, исходное сырье претерпевает некоторые стадии обработки, среди которых следует отметить измельчение (диспергацию). Чем более диспергировано вещество, тем более эффективна переработка, поскольку нагрев и испарение более мелких частиц происходит быстрее и с меньшими затратами энергии.

Из узла подготовки сырье поступает в ПХ реактор, где перемешивается с плазмой, поступающей из плазмотрона, нагревается, испаряется, вступает в различного рода химические реакции. Нередко плазма образуется в том же ПХ реакторе (совмещенный реактор – плазмотрон).

Продукты реакций охлаждаются и разделяются. Часто охлаждение производится с очень высокой скоростью (закалка):  $10^4 - 10^8$  К/с. Задача закалки состоит в сохранении тех продуктов, которые получились при высоких температурах и которые при охлаждении могут либо разложиться, либо вступить в другие химические реакции в процессе охлаждения.

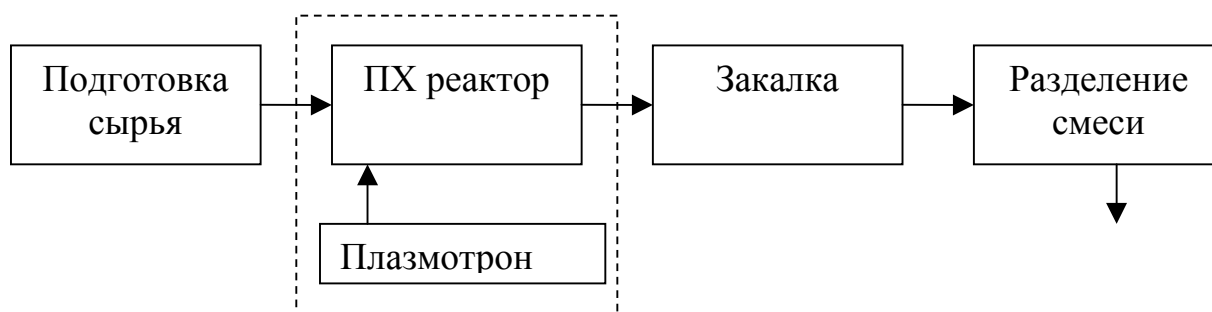


Рис. 1. Схема технологии плазмохимической переработки сырья

С помощью закалки можно получать вещества в метастабильном состоянии, отличающимся от нормального состояния (структурой, электрическими, термическими и другими свойствами).

Наиболее масштабные плазменные процессы реализованы в **металлургии**, причем на всех ее стадиях: вскрытия рудного сырья, восстановления металлов, финишной обработки полученных продуктов.

### Плазменные процессы вскрытия рудных минералов

Под вскрытием подразумевается разложение химически сложного минерала на более простые вещества, из которых легко выделить необходимые продукты.

В качестве примера отметим плазменную переработку минерала циркона  $ZrSiO_4$ . Схемы ПХ реакторов для этого процесса, которые, в общем, являются типичными для большинства процессов плазменной переработки неорганического сырья, приведены на рис. 2 [1]. Измельченное исходное сырье подается в плазменную струю, нагревается до высоких температур, испытывает превращения и падает вниз, где охлаждается и проходит

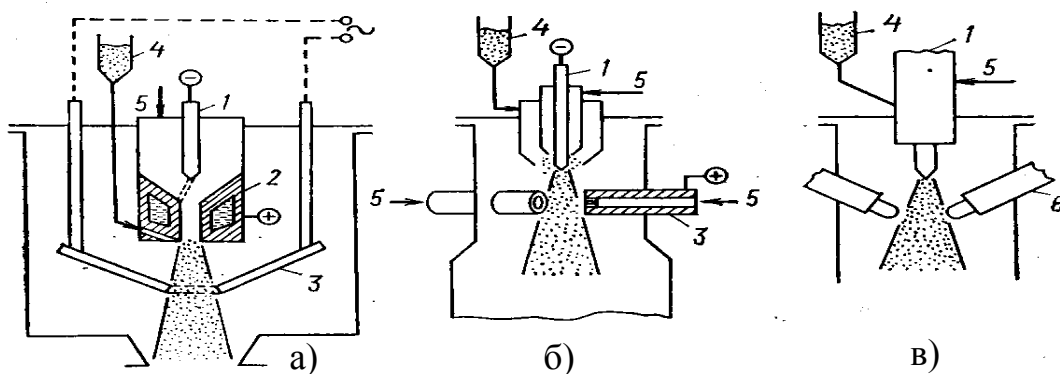


Рис. 2. ПХ реакторы для переработки циркона фирмы «Ионарк смелтерс»: а – с графитовыми электродами; б – с электродами, продуваемыми газом; в – с фазными плазмотронами-анодами; 1 – катод; 2 – сопло-анод; 3 – графитовые электроды; 4 – бункер с измельченным сырьем; 5 – плазмообразующий газ; 6 – фазные плазмотроны-аноды

дальнейшую обработку.

В случае циркона после его прохождения через плазму образуется механическая смесь окислов циркония и кремния ( $ZrO_2 + SiO_2$ ), которая легко разделяется.

На этом принципе в США организовано промышленное производство окиси циркония. Получаемая таким образом  $ZrO_2$  оказывается более высокого качества, чем в обычной технологии при более низких капиталовложениях и удельных расходах электроэнергии (2.2 кВт·ч/кг против 9.2 кВт·ч/кг в обычных печах). Данный процесс характеризуется

отсутствием загрязнения окружающей среды отходящими газами и побочными продуктами.

Аналогичным образом обрабатывают роданит, серпентиновую руду, ильменит, молибденит и другие минералы с целью получения оксидов металлов с дальнейшим их восстановлением до металлов.

### **ПХ процессы восстановительные в черной металлургии**

Металлургия входит в число наиболее экологически «грязных» производств и образует около одной четверти всех мировых загрязнений. Большая часть из них приходится на черную металлургию. Рассмотрим тенденции развития черной металлургии и возможную роль плазменных процессов. В черной металлургии наибольший экологический ущерб наносит агломерационное производство (51–53 %) и существенный – коксохимическое производство (6–12 %).

Известно, что широко распространенный традиционный доменный способ получения металла, несмотря на большую производительность и высокую степень освоения, обладает рядом недостатков: многостадийностью, связанной с предварительной стадией переработки сырья (агломерация, окомковывание) и восстановителя (коксохимическое производство), загрязнением окружающей среды, материалоемкостью и энергоемкостью.

Поэтому в мире всегда проявлялся интерес к поискам бескоксовой и безагломерационной металлургии. Особенно этот интерес усилился в последние 10–15 лет. Это связано с истощением запасов качественных коксующихся углей и вынужденным переходом на некачественные угли, с увеличением стоимости кокса, с ужесточением требований по охране окружающей среды, с постоянно растущими требованиями к качеству металлов, с возможностью организации эффективного маломасштабного производства металла бескоксовым способом на базе местных ресурсов сырья и топлива при ограниченных финансовых возможностях.

Развитие процессов бескоксowego производства металла в настоящее время связано с развитием сектора мини-заводов. В черной металлургии мира эта динамика наблюдается уже 25 лет. Более 300 мини-заводов выплавляют около 30 % мирового производства стали, составившего в 2000 г. 828 млн. т [2].

В настоящее время происходит постоянное наращивание мощностей бескоксовой металлургии (удвоение производства происходит каждые 7–8 лет), связанной, в основном, с бескоксовым получением в шахтных печах металлизированного сырья (губчатого железа) со степенью металлизации более 90 % (обычно 92–96 %) для выплавки стали с использованием в качестве восстановителя природного газа (способы «Мидрекс», «Хил» и др.). В 2000 г. было произведено в мире 43.2 млн. т металлизированного сырья.

Однако считается, что темпы роста бескоксowego производства с использованием природного газа в качестве восстановителя в дальнейшем будут снижаться из-за удорожания природного газа.

Здесь следует отметить, что в упомянутых выше процессах непосредственным восстановителем является не природный газ, а синтез-газ ( $\text{CO} + \text{H}_2$ ), который получают на дополнительной стадии конверсии природного газа.

***Таким образом, получается, что природный газ, в общем, не нужен, а нужен синтез-газ, который можно получить, в принципе, из любых органических веществ путем их термической переработки. И здесь роль плазмы оказывается существенной.***

Углеродсодержащим сырьем для получения синтез-газа может служить любой вид материалов, содержащих углерод: газообразные и жидкие углеводороды, уголь, торф, биомасса, промышленные и бытовые отходы. Для стехиометричности состава в качестве недостающего кислородсодержащего сырья используются вода (водяной пар), двуокись углерода, воздух и кислород.

В принципе синтез-газ можно получать (и получают) без всякой плазмы обычным процессом сжигания. Однако в отличие от таких методов плазменный метод позволяет обеспечить низкое содержание  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  в продуктах конверсии или полное их отсутствие и, таким образом, исключить дорогостоящую операцию очистки там, где синтез-газ требуется достаточно чистым, в том числе в металлургии.

При плазменном пиролизе, благодаря высоким температурам, реализуемым в зоне реактора, продукты пиролиза состоят из газовой составляющей. Степень превращения сырья в целевые продукты при этом близка к 100 %. Причем в газообразных продуктах отсутствуют смолы, фенолы и углеводороды, загрязняющие продукты обычной газификации сырья.

Для реализации процесса в качестве ПХ реакторов часто используют достаточно вместительные емкости, обычно футерованные внутри высокотемпературными материалами, выдерживающими рабочие температуры процесса (рис. 3 [3] и 4 [4]).

Плазменный газификатор, схема которого приведена на рис. 4, используется для получения газа-восстановителя при производстве губчатого железа в процессе Plasmared, разработанного шведской фирмой SKF Steel Engineering AB. В первом варианте для получения восстановительного газа использовали только уголь и водяной пар (реакция  $\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$ ). В дальнейшем фирма SKF разработала процесс получения синтез-газа из различных углеродсодержащих соединений: торфа, биомассы, отработанных масел, угля, бытовых и промышленных отходов.

Фирма «Плазма энерджи» (США) также разработала ПХ процесс получения топливного газа из угля, торфа и различных органических отходов (в том числе из старых автопокрышек). Стоимость такого топлива сопоставима со стоимостью импортируемой в США нефти.

Наиболее крупное производство конвертированного газа из угля и биомассы для восстановления губчатого железа реализована в ЮАР немецкой фирмой «Хюльс» (более 250 тыс. т в год).

Таким образом, ПХ переработка органических материалов в конвертированный газ (синтез-газ), уже в настоящее время становится рентабельным и развивается, особенно в металлургии, которая постепенно переходит к бескокосовым способам производства металла, а синтез-газ в будущем станет основным восстановителем.

Поэтому среди разрабатываемых технологий бескокосовой металлургии являются перспективными технологии плазменного восстановления. При этом большое внимание во многих странах уделяют разработке ПХ процессов для черной металлургии, что связано с устранением присущих ей недостатков, отмеченных выше.

***Плазменное восстановление железорудного сырья разрабатывается в двух направлениях: твердофазное получение губчатого или порошкового железа и восстановительная плавка.***

Типичная схема данных технологических процессов приведена на рис. 5 [5], где представлена схема процесса, разработанная фирмой SKF (Швеция). В качестве сырья для восстановительного газа могут использоваться любые органические материалы.

Интенсивно ведутся работы по плазменной восстановительной плавке чугуна из рудного сырья. Такие опытно-экспериментальные установки с противоточной шахтой, прямоточными вертикальными реакторами с водоохлаждаемыми или футерованными металлическими стенками, установленными над ванной-сборником расплава, имеются в США, Франции, Швеции, Австрии, Бельгии и ряде других стран. Получающийся чугун по составу близок к доменному.

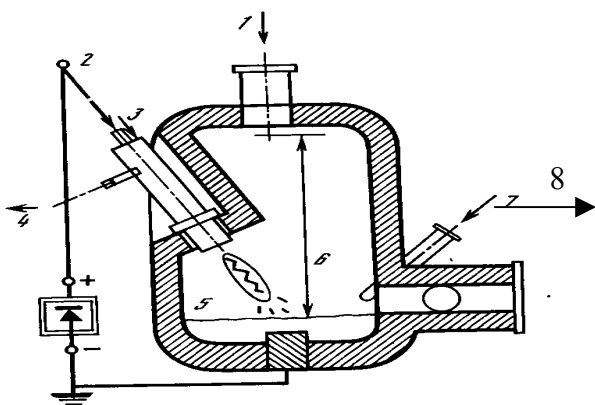


Рис. 3. ПХ реактор с расплавом стали: 1–4 – подача угля (размер зерен 1.8 см), воды, азота и воды соответственно; 5 – расплав стали; 6 – зона выделения летучих; 7 – пар; 8 – газовый продукт

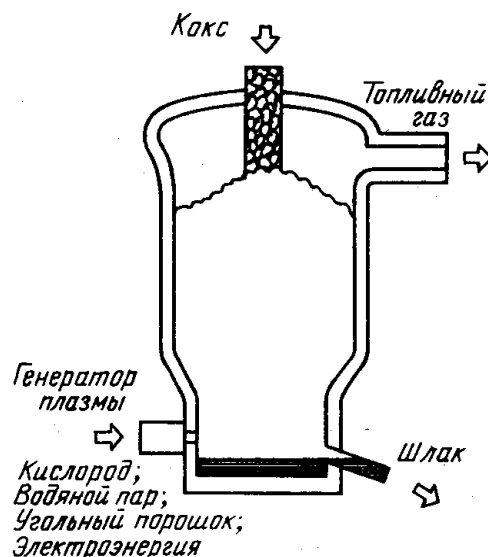


Рис. 4. Плазменный газификатор шахтного типа

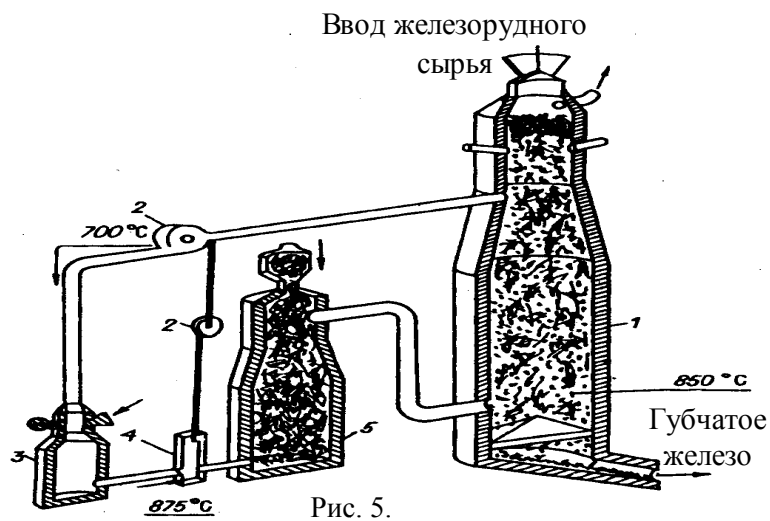


Рис. 5.

Схема процесса получения губчатого железа  
1 – восстановительная печь; 2 – компрессоры; 3 – плазменный газификатор; 4 – смеситель газов; 5 – доломитовый фильтр.

### Восстановление цветных и редких металлов и их соединений

Получение цветных, редких металлов и восстановительный синтез соединений их с углеродом, азотом, бором, кремнием предоставляют намного более широкие возможности для применения низкотемпературной плазмы, чем черная металлургия. Это обусловлено не только обширной номенклатурой видов сырья и продуктов, но и меньшими объемами производства, а также повышенными требованиями к его экологической чистоте [5].

Все варианты существующих восстановительных плазменных агрегатов в этой области можно разделить на две основные группы: в первой процессы идут с жидкой ванной

расплава, во второй формирование целевого продукта осуществляется в газодисперсном потоке при смешении его с плазменной струей. Сырье в обоих случаях может быть введено в высокотемпературную зону аппарата в виде паров, расплава, раствора или порошка необходимой крупности.

Плазменные печи с керамической ванной обладают достаточной универсальностью и поэтому многие из них, опробованные в черной металлургии, с успехом используются для получения цветных металлов, таких как никель, кобальт, магний, ванадий, молибден, олово и др.

Для многотоннажных процессов цветной металлургии значительный интерес представляет проблема переработки рудного трудновскрываемого сырья и промышленных отходов с выделением таких металлов, как Zn, Pb, Cu, Ni, Co, Sn, Cd, Bi, PMЗ, драгметаллов, платиноидов. Некоторые из таких процессов реализованы [5, 6].

**Третьей стадией** использования плазмы в металлургии является заключительная (финишная) обработка продуктов: переплав металлов и сплавов, их рафинирование, легирование и др. Следует отметить, что в данных промышленных процессах **роль плазмы наиболее значительна**. Плазменный переплав по сравнению с другими способами получения чистых металлов и сплавов обладает рядом технологических преимуществ. Это, прежде всего, возможность широкого регулирования состава и давления газовой атмосферы над расплавом, скоростей плавления заготовок и кристаллизации слитка, выбора различных рафинирующих флюсов.

В зависимости от состава газовой смеси при плазменном переплаве могут проходить либо процессы рафинирования, либо легирования. Например, переплав в восстановительной атмосфере позволяет эффективно удалять кислород, а в атмосфере азота или углекислого газа проводить легирования расплава азотом, углеродом или водородом [5].

Среди плазменных процессов в металлургии особое место занимают процессы получения и формообразования дисперсных материалов: плазменная порошковая металлургия – один из наиболее перспективных путей применения плазмы. Это направление охватывает получение порошков (в том числе ультрадисперсных) плазмохимическим образом (восстановление, синтез), испарением и перекомденсацией, диспергированием расплавов, а также процессов формообразования, сфероидации и плакирования. Последний процесс представляет большие возможности для создания композитных материалов.

Наиболее освоенными являются процессы получения высокодисперсных порошков металлов и их соединений: карбидов, нитридов, карбонитридов, боридов, силицидов при струйно-плазменном восстановлении оксидного и галоидного сырья. В лабораторном и промышленном масштабах освоены процессы производства высокодисперсных порошков W, Wo, Ta, Nb, карбидов Ta, Nb, Ti, Si, B, W, V, Zr, Hf, нитридов Ti, Si, Nb, Ta, B, V, карбонитридов, боридов, силицидов и других соединений при восстановлении оксидов, хлоридов, фторидов и других солей этих элементов при контакте с водородом, природным газом, аммиаком, азотом и при использовании дуговых, высокочастотных и сверхвысокочастотных генераторов низкотемпературной плазмы [5–10].

**В качестве примера рассмотрим возможное использование ПХ технологий в Карелии, где сложилась следующая ситуация:**

– с одной стороны, в результате производственной деятельности лесопромышленного комплекса (лесных, деревообрабатывающих и целлюлозно-бумажных предприятий) накоплены и ежегодно образуются сотни тысяч тонн органических отходов, которые, в основном, выбрасываются и загрязняют окружающую среду. **Утилизация данных отходов является актуальной задачей;**

– с другой стороны, имеются рудные ископаемые (оксиды металлов железа, титана, олова, цинка, меди, ванадия и др.), которые могут использоваться для получения металлов и сплавов. Поиск способов и технологий, способствующих вовлечению в производство данных ископаемых (то есть развития металлургии), **также является актуальной задачей.**

Имеющийся в Карелии Костомукшский ГОК сосредотачивает в себе наиболее экологически «грязную» часть доменного производства и производит к тому же наименее ценную продукцию (окатыши) в цепочке доменного производства.

Для улучшения данной ситуации, повышения степени передела исходного сырья и повышения стоимости конечной продукции и увеличения рентабельности ГОКа является перспективным дооснащение (хотя бы частично) его агрегатами бескоксовой металлургии, тем более, что исходное сырье ГОКа (магнетитовые концентраты), содержащее более 65 % железа, допускает дальнейшую металлизацию. При этом в качестве восстановителя может использоваться синтез-газ, получаемый при пиролизе органического сырья, в основном, растительного происхождения: древесное сырье, торф, отходы лесной, деревообрабатывающей и целлюлозно-бумажной промышленности, а также бытовых отходов (в Карелии отсутствуют ископаемые восстановители – природный газ, нефть, уголь).

В качестве дополнительных агрегатов бескоксовой металлургии здесь могут быть использованы агрегаты, схемы которых приведены на рис. 4, 5. В табл. 1 приведены некоторые экономические показатели организации производства мощностью 500 тыс. тонн по переработке железорудных окатышей Костомукшского ГОКа в губчатое железо бескоксвым способом. Считалось, что стоимость восстановительного газа после транспортировки отходов и газификации не будет превышать стоимость восстановителя, полученного из природного газа. При расчетах использовались данные, приведенные в работе [2].

Таблица 1

Некоторые ориентировочные показатели для производства первичного железа на Костомукшском ГОКе по внутренним ценам России 2000г.

Исходное сырье	Железорудные окатыши
Продукция	Губчатое железо в форме окатышей
Мощность	500 000 тонн в год
Сухие органические отходы	500 000 тонн в год
Расход электроэнергии (в зависимости от степени применимости плазмы)	5–500 миллионов кВт·ч.
Капитальные затраты на строительство	30 млн. долларов США
Себестоимость 1 тонны губчатого железа	44 долл. США
Цена на рынке СНГ за 1 т	50–60 долл. США
Цена на рынке Европы и США	130–180 долл. США

**Однако более существенным улучшением ситуации явилось бы переход не только к бескоксовой, но и безагломерационной технологии.**

Концентраты Костомукшского ГОКа чрезвычайно мелки (размеры частиц меньше 60 мкм). Материалы именно такой степени измельченности успешно применяются в плазменных методах переработки, в том числе и при восстановлении оксидов металлов. Поэтому, данные концентраты напрямую, без какого либо укрупнения могут использоваться в плазмохимических технологиях восстановления и получения первичного железа как в дисперсном, так и в компактном виде. При этом из технологической цепочки исключались бы многие стадии, в том числе наиболее экологически «грязные» стадии агломерации.

Однако в отличие от вышеприведенной технологической схемы металлизации окатышей, которая достаточно хорошо отработана в мире, безагломерационная схема восстановления такого мелкодисперсного концентрата разработана пока недостаточно для промышленного воплощения.

Данная технология разрабатывается в Петрозаводском университете. На рис. 6 представлена схема установки для отработки процессов прямого восстановления магнетитовых концентратов на лабораторном уровне с электрической мощностью до 30 кВт и производительностью до 20 кг концентрата в час.



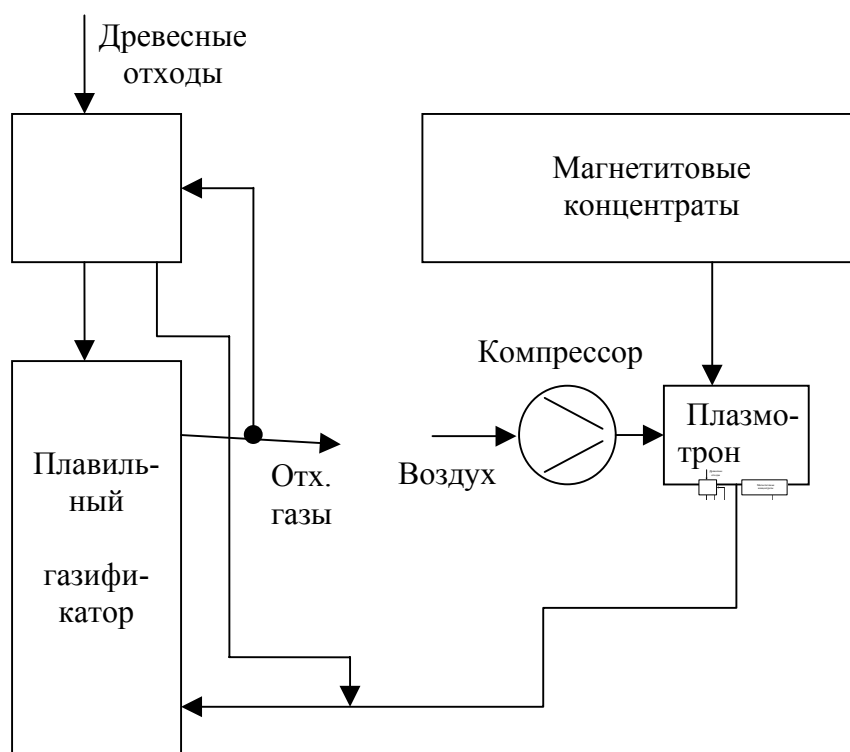


Рис. 6. Схема лабораторной технологической установки для восстановления магнетитовых концентратов древесными отходами

**Основным недостатком плазменных технологий**, до сих пор сдерживающих их широкое применение, является потребление большого количества электроэнергии. Однако при наличии достаточно дешевого органического сырья потребление электроэнергии можно существенно уменьшить за счет окисления (сжигания) части этого сырья, то есть перейти от чисто плазменных к топливно-плазменным методам, а генераторы плазмы (плазмотроны) использовать только для поддержания и стабилизации необходимых температурных режимов с минимальным потреблением электроэнергии. Табл. 2 иллюстрирует степень уменьшения потребления электроэнергии при прямом восстановлении концентратов древесными отходами на упомянутой установке.

Таблица 2

Соотношение затрат электроэнергии и сухой древесины на восстановление 1 кг железа из магнетитового концентрата (67 % Fe) с воздушным дутьем при 100 % восстановлении

Масса древесины на 1 кг Fe (кг)	Масса древесины на 1 кг концентрата (кг)	Содержание воздуха (в массовых % к древесине)	Соотношение масс концентрата и древесины	Потребление электроэнергии (кВт·ч/кг Fe)
0,50	0,33	0	3,0	1,1
0,68	0,45	25	2,2	0,8
0,84	0,56	67	1,8	0,7
1,07	0,71	100	1,4	0,5
1,16	0,77	122	1,3	0,3
1,50	1,00	150	1,0	0
2,10	1,40	186	0,7	-1,1

### **Литература:**

1. Сурис А. Л. Плазмохимические процессы и аппараты. М.: Химия, 1989. 304 с.
2. Романец В. А. Новые процессы производства металла: состояние и перспективы // Металлург. 2001. № 11. С. 30–38. № 12. С.31–33.
3. Жуков М. Ф., Калинин Р. А., Левицкий А. А., Полак Л. С. Плазмохимическая переработка угля М.: Наука, 1990. 200 с.
4. Туманов Ю. Н. Низкотемпературная плазма и высокочастотные электромагнитные поля в процессах получения материалов для ядерной энергетики. М.: Энергоатомиздат, 1989. 280 с.
5. Низкотемпературная плазма. Т. 8: Плазменная металлургия. Новосибирск: Наука, 1992. 265 с.
6. Yu. V. Tsvetkov Plasma metallurgy: current state, problems and prospects // Pure Appl. Chem. 1999. V. 71. №. 10. P. 1853–1862.
7. Оулет Р., Барбье М., Черемисинов П. Технологическое применение низкотемпературной плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1983. 144 с.
8. Туманов Ю. Н. Современное состояние развития плазменных процессов в технике, технологии и металлургии // Химия плазмы. Вып. 13 / Под ред. Б. М. Смирнова. М.: Энергоатомиздат, 1986. С. 163.
9. Низкотемпературная плазма. Т.4: Плазмохимические технологии. Новосибирск: Наука, 1991. 454 с.
10. Бугаенко Л. Т., Кузьмин М. Г., Полак Л. С. Химия высоких энергий. М.: Химия, 1988. 368 с.