



*В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, Президиум НАН Беларуси*

*23 января 2007 г. в г. Новополоцке состоялось экстренное совещание по вопросу готовности нашей страны к работе в новых ценовых условиях поставки ресурсов, на котором Президентом Республики Беларусь А.Г. Лукашенко дано поручение Национальной академии наук Беларуси по разработке директивы, направленной на экономию и бережливость энергетических и материальных ресурсов.*

*Учитывая постоянную тенденцию роста мировых цен на топливо и сырье, сегодня особую актуальность приобретают вопросы энергетической и сырьевой независимости Республики Беларусь. В связи с этим на обсуждение научной общественности и лицам, занимающимся вопросами разработки собственных сырьевых ресурсов, выносится статья Заместителя Председателя Президиума Национальной академии наук Беларуси В.И. Тимошпольского о развитии металлургического комплекса на базе промышленного освоения железных руд для использования в Республике Беларусь.*

## **РАЗВИТИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НА БАЗЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ОСВОЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД (ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ. В ПОРЯДКЕ ОБСУЖДЕНИЯ)**

Одним из приоритетных направлений развития промышленного комплекса Республики Беларусь является наращивание производства металлопродукции, производимой металлургическими и машиностроительными предприятиями.

За последние пять лет в республике отмечается устойчивый рост производства металлопродукта и изделий из черных и цветных металлов. Например, годовое производство металлопродукции РУП «Белорусский металлургический завод» увеличилось за этот период в 1,5 раза, достигнуто в 2006 г. около 2 130 тыс. т стали.

Решение поставленных Президентом Республики Беларусь на Третьем Всебелорусском народном собрании задач по наращиванию темпов экономического развития страны приведет к дальнейшему росту потребления наукоемкой металлопродукции на внутреннем рынке, а также увеличению производства экспортно-ориентированной продукции, производимой как Белорусским металлургическим заводом, так и ведущими машиностроительными предприятиями.

Несмотря на постоянный рост производства, отечественные предприятия импортируют более 5 млн. т в год металлопродукции, которая не производится на РУП «БМЗ», и 1,2–1,3 млн. т в год металлолома, цена которого на сегодняшний день приближается к 300 долл. США/т. Следует отметить также, что цена и на металлопрокат, например сортовой, находится на уровне 700–750 долл. США/т.

Анализ структуры экспортно-импортных поставок черных металлов Республики Беларусь показывает, что импортная составляющая постоянно преобладает над экспортной. Внешнеторговый баланс по черным металлам за 2000–2004 гг.

являлся постоянно отрицательным и в среднем за год составил 315 млн. долл. США в пользу импортных закупок. В 2005 г. он составил 178 млн. долл., а в 2006 г. — около 200 млн. долл., что для развивающегося государства недопустимо.

Изложенное свидетельствует о необходимости максимально возможного развития собственной сырьевой базы для дальнейшего реформирования и развития металлургического комплекса страны.

Анализ динамики мирового потребления железорудного сырья говорит об устойчивом спросе на него. Так, в 2004 г. общее потребление железорудного сырья металлургическими компаниями находилось на уровне 1,5 млрд. т, а в 2009 г., по прогнозам АМЕ Mineral Economics, достигнет 1,9 млрд. т.

Конъюнктура рынка железорудного сырья характеризуется динамикой производства стали и чугуна. Начиная с 2002 г. ситуацию на рынке определяют страны азиатского континента и, в первую очередь, Китай, который стал основным «двигателем прогресса» в черной металлургии в мире. При общем мировом производстве стали в 2006 г. более 1,2 млрд. т на долю Китая приходилось около 32%.

Ежегодный импорт железорудного сырья в Китай составил около 150 млн. т, второе место в мире по импорту занимает Япония (более 130 млн. т). Крупнейшими экспортёрами являются Австралия и Бразилия (более 180 млн. т), Индия (55–60 млн. т), Канада, ЮАР, Украина (28–20 млн. т).

Основными компаниями-экспортёрами железорудного сырья являются три мировых лидера горнодобывающей отрасли (бразильская CVRD, британская Rio Tinto Plc и австралийская BHP



Billiton), которые контролируют 70% мирового рынка железной руды и фактически диктуют цены на железорудное сырье.

В Республике Беларусь имеются два железорудных месторождения, которые были открыты Государственным предприятием «Белгеология» в 1966–1970 гг.: Новоселковское и Околовское.

*Околовское месторождение с запасами железной руды в количестве 166,8 млн. т расположено в Столбцовском районе Минской области и залегает на глубине 220–360 м. Среднее содержание железа составляет 24,3%. В настоящее время на месторождении Департаментом по геологии Республики Беларусь завершена предварительная разведка и сделан вывод о целесообразности проведения детальной разведки.*

*По результатам технологических испытаний доказана возможность получения из добываемых руд месторождения магнетитового концентрата с содержанием железа магнетитового 65,4% и извлечением последнего 95,2%.*

*Новоселковское месторождение представлено титан-магнетитовыми рудами и расположено в Кореличском районе Гродненской области на глубине 148–175 м. По результатам поисково-оценочных работ подсчитанные запасы до глубины 700 м составляют: железа общего 133,6 млн. т, диоксида титана – 5,7 млн. т, пентаоксида ванадия – 205,7 тыс. т.*

Залежи железной руды, имеющиеся в Беларуси, относятся к бедным месторождениям, но вместе с тем мировой опыт добычи и использования железорудного сырья показывает, что и бедные железные руды вполне эффективно могут быть использованы для создания собственной сырьевой базы.

Ситуация по созданию горно-металлургической отрасли в республике не является новой. Еще в 1989–1992 гг. (в период фактического распада СССР) тогдашнее руководство Белорусского металлургического завода совместно со специалистами комплексной научно-производственной лаборатории «Проблемы металлургического производства» Белорусского политехнического института (ныне Белорусский национальный технический университет) приступили к детальному изучению этого вопроса. Для изучения возможности получения собственного железорудного сырья, а также сопоставительного анализа современных металлургических процессов группа специалистов направлялась на Оскольский электрометаллургический комбинат (Белгородская область), на котором впервые в Европе с середины 80-х годов функционирует комплекс Midrex для производства металлизированных окатышей, и в Южно-Африканскую Республику, где эксплуатируются первые в мире установки Correx (австрийской компании «Voest Alpine») для получения жидкого чугуна.

В этот период белорусскими специалистами рассматривались предложения таких фирм, как «Лурги», «Voest Alpine», ведущих японских компаний и др. Все это подтверждает, что возникшая

проблема максимального использования железорудного сырья и создания горно-металлургической отрасли прекрасно апробирована в развитых странах и сегодня весьма актуальна в России, Украине и других металлургически развитых странах.

Полагаем, что Республика Беларусь не является исключением и сегодня необходимо вернуться к рассмотрению этой проблемы на высшем государственном уровне.

Анализ тенденций развития мировой металлургии показывает, что сегодня имеют место два направления:

- совершенствование технологий и оборудования с использованием традиционной (классической) схемы производства металлопроката (коксовая металлургия): агломерационное производство – производство чугуна в доменных печах – производство стали в конвертерах или мартеновских печах – разливка стали в изложницы и непрерывным литьем (МНЛЗ) и прокатка слитков на обжимных станах типа блюминг, слябинг заготовок на сортовых станах и т.д.;

- разработка и освоение альтернативных процессов получения железа (бескоксовая металлургия) при использовании процессов Midrex, Correx, HYL и др.

Выбор технологии переработки железных руд является комплексной задачей, включающей экономические факторы (капитальные и эксплуатационные затраты, себестоимость продукции, условия производства) и технические аспекты (состав шихты, физические и металлургические свойства).

Ниже нами приведен анализ традиционных и альтернативных технологий с целью модернизации металлургической промышленности Республики Беларусь при создании собственной горно-металлургической отрасли.

#### Агломерационное и доменное производство

В качестве шихтовых материалов доменной плавки можно использовать железорудное сырье в виде агломерата (до 100%), окатышей (до 100%) либо смешанную шихту из агломерата и окатышей. В качестве топлива используются кокс и пылеугольное топливо, при этом расход кокса составляет 550–650 кг/т чугуна.

При подготовке шихтовых материалов к доменной плавке железная руда подвергается дроблению, грохочению, обогащению и затем из концентрата получают агломерат или окатыши.

Главными недостатками доменной технологии являются высокие удельные энергозатраты (табл. 1) и, как следствие, высокая себестоимость продукта. Из таблицы следует, что энергоемкость чугуна, произведенного по традиционной технологии, практически на порядок превышает энергоемкость окатышей и рудного концентрата, из которых, в свою очередь, можно получить чугун с применением технологий бескоксовой металлургии.

Таблица 1. Технологические топливные числа (ТТЧ)\* и энерготехнологические производительности (ЭТП) [1]

Наименование	ТТЧ, кг у.т./ед.изм.	ЭТП, ед.изм/кг у.т.
Руда железная, т	1,0–10,0	1,0–0,1
Рудный концентрат, т	15–50	0,07–0,02
Агломерат и окатыши, т	150–190	0,007–0,005
Чугун (передельный и литейный), т	1050–1150	0,001
Сталь (слитки и заготовки), т	600–1400	0,0017–0,0007
Прокат, т	1100–1600	0,0009–0,0006

\* ТТЧ включает в себя затраты всех видов энергии в данном и во всех предшествующих переделах технологического процесса (включая расход на добычу, транспортирование, переработку полезных ископаемых и производство сырья, материалов, деталей), пересчитанных на необходимое для их получения топливо (в кг условного топлива на единицу продукции) за вычетом вторичных ресурсов.

Вместе с тем в ходе доменной плавки чугуна производится доменный газ в количестве 2 тыс. м<sup>3</sup>/т чугуна с теплотой сгорания 3,6–4,2 МДж/м<sup>3</sup>, при этом 70% газа может быть использовано в качестве свободного энергоносителя в оборотной схеме, например, в прокатном производстве.

Учитывая мировые тенденции по развитию угольной энергетики и перспективы использования тощих каменных (высококалорийных) углей в условиях Республики Беларусь на уровне 3 млн. т (к 2020 г.), целесообразно исходить из концепции комплексного использования углей, которая предусматривает использование углей как первичного сырья при создании собственной коксохимической промышленности.

Производство кокса осуществляется в коксовых батареях, при этом, помимо кокса, получают коксовый газ (до 60% газа можно использовать в качестве свободного энергоносителя) и другие ценные продукты.

Из 1 т сухой угольной шихты получают:

- кокс – 650–750 кг (65–75%) с низшей теплотой сгорания ~30 МДж/кг (для сравнения теплота сгорания природного газа 33–35 МДж/м<sup>3</sup>);
- коксовый газ – 320 м<sup>3</sup> (13–15%) с различной теплотой сгорания ~17–20 МДж/м<sup>3</sup>. Состав коксового газа, %: Н<sub>2</sub> – 56–62; СН<sub>4</sub> – 23–26; СО – 4–6; СО<sub>2</sub> – 2; N<sub>2</sub> – 2–4; О<sub>2</sub> – менее 1. При этом коэффициент использования теплоты ( $\eta_{\text{KIT}}$ ) коксового газа выше значения  $\eta_{\text{KIT}}$  природного газа на 16%;
- каменноугольную смолу – ~38 кг;
- бензол – ~11 кг и др.

Для производства кокса используют концентраты и рядовые малозольные угли марок Ж (жирный), К (кокосый), ОС (отощенный спекающийся), Г (газовый), Т (тощий) и другие в различных комбинациях.

Таким образом, при создании собственного доменного производства производительностью, например 1 млн. т чугуна, очевидны и

определенные преимущества – возможность получения свободного энергоносителя в виде доменного и коксового газов (в суммарном количестве 300–350 тыс. т у.т. в год).

Как отмечено в работе [2], доменное производство как техническая система себя не исчерпала, при этом процесс совершенствования в основном решается трансформацией доменной печи по двум основным направлениям – дальнейшей дифференциацией, характерной для развития производства чугуна в ХХ в., и созданием гибридных форм с другими металлургическими процессами (например, ваграночно-доменный гибрид, чугуноплавильный агрегат с выносной шахтой, процесс Corex и др.).

### Процессы бескоксовой металлургии

На рис. 1 систематизированы данные о разработанных технологиях получения чугуна и полупродукта (окатышей и горячебрикетированного железа). Краткая характеристика наиболее распространенных и опробованных процессов приведена в табл. 2 [3].

Основные технологии внедоменного получения металла, или бескоксовой металлургии, можно разделить, с одной стороны, по виду готового продукта (металлизованное сырье, чугун и др.), а с другой – по виду используемого топлива (природный газ или уголь) [3].

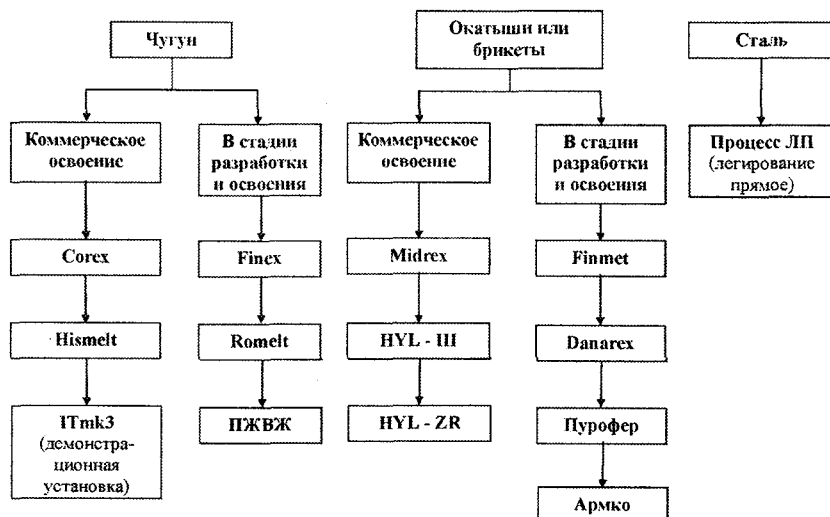


Рис. 1. Классификация методов бескоксового получения металла



Таблица 2. Характеристика процессов бескоксowego получения металла [3]

Процесс	Продукт	Максимальная производительность установки, млн. т/год	Степень промышленного освоения	Дальнейшее развитие процесса	Используемое топливо	Исходный материал	Установка
Corex	Чугун	1,0	Коммерчески освоенный	Начато строительство установки мощностью 1,5 млн. т/год, Baosteel (Китай)	90% угля +10% кокса	Агломерат, доменные окатыши, богатая кусковая руда	Шахтная печь + плавильный реактор
HISmelt	Чугун	0,82	Полупромышленный	Планируется строительство двух установок мощностью 0,8 млн. т/год, Laiwu Steel (Китай) и Kwinana (Австралия)	Уголь	Концентрат	Плавильный реактор
ITmk3	Чугун	0,25	Демонстрационная	Планируется строительство четырех установок мощностью по 0,5 млн. т/год, Миннесота и Индиана (США)	Уголь, природный газ	Рудоугольные окатыши	Печь с вращающимся подом (RHF)
Midrex	Окатыши или брикеты	1,36	Коммерчески освоенный	Строится семь установок мощностью до 1,76 млн. т/год	Природный конвертированный газ	Окатыши под металлзацию	Шахтная печь
HYL-III	Окатыши или брикеты	1,1	Коммерчески освоенный	—	Природный конвертированный газ	Окатыши под металлзацию	Шахтная печь
HYL-ZR	Окатыши или брикеты	0,8	Коммерчески освоенный	Предложение Ferrostaal для МГОКа — установка мощностью 1,72 млн. т/год	Природный конвертированный газ	Окатыши под металлзацию	Шахтная печь

Актуальность проблемы бескоксовой металлургии железа возрастает в связи с тем, что для производства кокса пригодны только 10–15% разведанных запасов углей [4].

**Производство окатышей или горячбрикетированного железа**

Процесс Midrex получил наибольшее распространение (рис. 2) и является наиболее освоенным в промышленном аспекте [3]. В настоящее время в мире действуют всего 44 установки, из них 22 установки единичной годовой мощностью 400–450 тыс. т, 17 – 559–800 тыс. т, 3–1 млн. т, по одной установке – 1,2 и 1,36 млн. т. По данным фирмы «Voest Alpine» (Австрия) [5], которая является лицензиатом процесса Midrex, в общем объеме железа прямого восстановления, произведенном в 2004 г. в мире (около 50 млн. т в год), на долю цехов Midrex приходилось до 65%, т.е. около 30 млн. т/год.

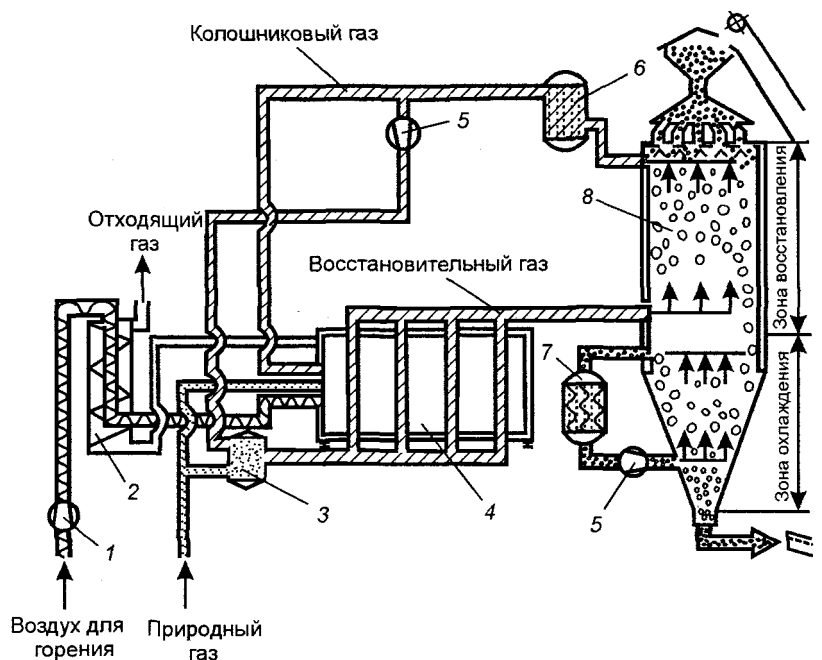


Рис. 2. Технологическая схема процесса Midrex: 1 – воздуходувка; 2 – теплообменник; 3 – смеситель газов; 4 – конвертер; 5 – компрессор; 6, 7 – скруббер для колошникового газа; 8 – шахтная печь

Восстановление железа по этой технологии основано на извлечении химически связанного кислорода из оксидов железа восстановительным газом, который вырабатывается в реформере из смеси оборотного технологического и свежего природного газов (при температуре 800–850 °С).

Традиционный процесс производства металлургических окатышей проводится в шахтных печах с использованием восстановительного газа (30% CO, 70% H<sub>2</sub>), получаемого путем конвертирования природного газа.

Шахтная печь (рис. 2) по высоте разделена на две зоны с двумя самостоятельными оборотными газовыми циклами. Сверху в печь загружаются железорудные окисленные окатыши, из нижней части — выгружаются металлургические окатыши. В верхней части печи под воздействием восстановительного газа происходит восстановление железа из оксидов. Процесс восстановления и продолжительность пребывания окатышей в верхней половине печи составляют 4–6 ч; температура окатышей в зоне восстановления — 760 °С. Опускаясь в нижнюю часть печи, металлургические окатыши попадают в нижний газовый цикл, где осуществляется их охлаждение смесью восстановительного и изолирующего газа. При выгрузке из печи окатыши имеют температуру около 40 °С, содержание металлического железа — 90–93%. Суммарное время пребывания окатышей в шахтной печи составляет 8–12 ч.

Во второй половине 90-х годов для интенсификации процесса начали применять кислород (для повышения температуры газов). В 2005 г. такую технологию освоили и на Оскольском электрометаллургическом комбинате.

Для дальнейшей интенсификации процесса разработана технология ОХУ+, заключающаяся в производстве восстановительного газа путем взаимодействия природного газа и кислорода [3].

Основным недостатком процесса Midrex является необходимость использования природного газа в количестве до 550 м<sup>3</sup>/т окатышей, поэтому строительство таких комплексов целесообразно при наличии относительно дешевого природного газа.

**HYL (ХИЛ)** — процесс получения металлургических окатышей или брикетов газом, полученным паровой конверсией природного газа. Этот процесс достаточно подробно изучался нами еще в начале 90-х годов прошлого века.

Технология, получившая название HYL-I, разработана и осуществлена мексиканской фирмой «Hoyalata у Lamina» в 1957 г. на заводе в г. Монтеррей (Мексика). В соответствии с технологией HYL-I сухой газ-восстановитель (6,6% CO<sub>2</sub>, 16,3% CO, 73,1% H<sub>2</sub>), нагретый до 1100 °С, вначале продувается (в течение 2 ч) сверху вниз через руду в двух первых ретортах (всего пять реторт), после охлаждается с отделением образовавшихся водяных паров, вновь нагревается и продувается (в течение 2 ч) через две следующие

реторты с целью предварительного нагрева и восстановления руды. В пятой реторте восстановленное губчатое железо 2–3 мин продувается сырым природным газом для насыщения железа углеродом до 0,5%, затем при температуре 750 °С загружается в электропечь. Степень восстановления железа в готовом продукте 75–95%.

В последующем процесс усовершенствован (HYL-II) и реализован в Бразилии, при этом предусмотрено прямое получение железа из окатышей (65–66% Fe) в четырех ретортах. Содержание железа в конечном продукте 86%.

В конце 70-х годов разработан и осуществлен непрерывный процесс HYL-III, требующий меньших капитальных и эксплуатационных затрат. При этом вместо реторт газы циркулируют по отдельным петлям.

Процесс HYL-III, второй после Midrex, наиболее развитый процесс газового восстановления железа, реализованный на десяти заводах в восьми странах [3]. Единственный в Европе завод по производству горячих металлургических брикетов из железорудного сырья мощностью 1 млн. т в год по технологии HYL-III построен в 1999 г. на Лебединском ГОКе [6].

Схема современной модификации этого процесса без реформера — HYL-ZR производительностью 800 тыс. т металлургических окатышей в год, функционирующей с 1998 г. на заводе HYLSA в г. Монтеррее, приведена на рис. 3.

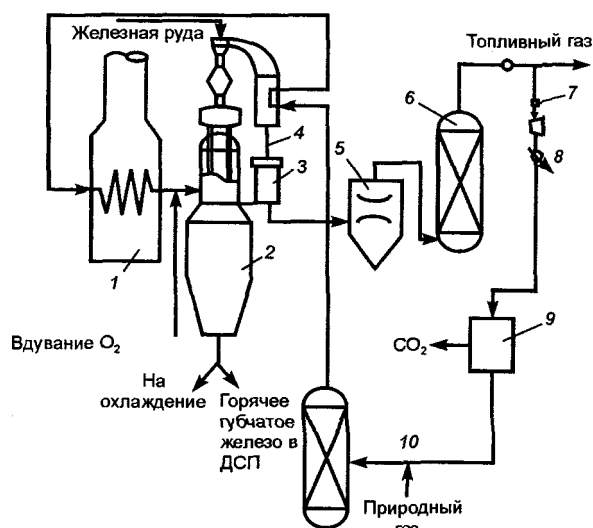


Рис. 3. Схема процесса HYL-ZR: 1 — нагреватель восстановительных газов; 2 — реактор; 3 — охладитель; 4 — рекуператор; 5 — скруббер; 6 — охладительная башня; 7 — компрессор; 8 — холодильник; 9 — вакуумный адсорбер CO<sub>2</sub>; 10 — увлажнитель

Как отмечено авторами [3, 7, 8], преимуществами этого процесса являются достаточная освоенность оборудования и технологии на агрегатах предыдущего поколения (HYL-I, HYL-III), возможность использования в шихте окатышей и кусковой руды в любом соотношении, отсутствие отдельного реформера, нечувствительность технологии к наличию серы в природном газе и руде,

возможность контроля содержания углерода в металлизированных окатышах (до 4%).

В 2006 г. итальянской фирмой «Danieli» и мексиканской фирмой HYL предложена технология ENERGIRON с целью получения высокоуглеродистого прямовосстановленного железа с содержанием углерода 3,5%, при этом капитальные затраты на строительство установки металлизации ENERGIRON будут ниже, а различия в себестоимости производства металлизированных окатышей составят на 3–6 долл. меньше, чем в процессе HYL-ZR [3].

**Процессы получения металлизированных окатышей, находящиеся в стадии разработки и освоения**

**Процесс Finmet** является, по мнению представителей фирмы «Voest Alpine», единственной технологией восстановления железа из руды мелких фракций, применяемой в настоящее время для получения высококачественного горячбрикетированного железа [6]. К 2005 г. построены два цеха, работающих по технологии Finmet (в Австралии на заводе Boodarie Iron фирмы BHP Billiton и Венесуэле на заводе Orinoco Iron). В последующем процесс Finmet усовершенствован и получил новое название Finmet Megatrain. Технология Finmet является экономически выгодным решением в тех случаях, когда можно применять природный газ для получения высококачественного брикетированного железа из дешевой рудной мелочи.

**Технология DANAREX** компании «Danieli» [9] позволяет производить металлизированные окатыши, которые пассивируются без брикетирования. Окатыши сертифицированы как безопасный для перевозки материал благодаря пассивации с использованием высоких температур в процессе их производства, а также относительно высокому содержанию углерода в форме соединения  $Fe_3C$ . Содержание углерода в окатышах 1,0–3,5%, в процессе плавки он полностью удаляется.

**Пурофер-процесс** (процесс восстановления окискованного железорудного сырья газом в шахтной печи прямоугольного сечения с закругленными углами) разработан немецкой фирмой «Hüttenwerk Oberhausen». Горячее (с температурой около 800 °С) губчатое железо непрерывно выгружается из печи, брикетуется и отправляется в электросталеплавильный цех. В 1977 г. построены две промышленные шахтные печи в Ахвазе (Иран) и Санта-Крузе (Бразилия). В 1980 г. обе шахтные печи остановлены в связи с высокими энергозатратами.

**Армко-процесс**, разработанный фирмой «Armco Steel Corp.» (США), предполагает две разновидности получения железа.

1. Процесс получения малоуглеродистой стали с особыми свойствами, разработанный в начале XX в., который осуществлялся в основной мартеновской печи. С развитием кислородно-конвертерного процесса и особенно при разработке технологии

вакуумного и вакуум-аргонного обезуглероживания Армко-процесс утратил свое значение.

2. Процесс прямого получения губчатого железа из руды (окатышей) в шахтной печи с использованием восстановительного газа, получаемого паровой конверсией природного газа. В 1972 г. в Хьюстоне (США) была сооружена промышленная шахтная печь (объем 300 м, диаметр 5 м) производительностью 1000 т/сут. Получаемое губчатое железо имело повышенную склонность к вторичному окислению на воздухе.

В связи с исключительно высоким расходом природного газа Армко-процесс дальнейшего развития не получил.

**Фиор-процесс** — многоступенчатый процесс получения губчатого железа восстановлением мелкой руды в реакторах кипящего слоя водородом, получаемым способом парокислородной конверсии природного газа. Процесс разработан фирмой «Esso Research & Engineering» (США) с использованием установки производительностью 5 т/сут. Промышленное производство губчатого железа (400 тыс. т/год) осуществлено в Матансасе (Венесуэла) в 1975 г. Процесс не получил пока широкого развития из-за относительно высокой энергоемкости и ограниченной сырьевой базы — высококачественных железных руд, не требующих обогащения.

**Хиб-процесс** — получение губчатого железа из мелкой руды в кипящем слое конвертированным газом с высоким содержанием водорода. Процесс разработан фирмой «United States Steel» (США), промышленная установка с реактором кипящего слоя мощностью 1 млн. т брикетов в год сооружена в г. Сьюдад-Гуаяна (Венесуэла). В 1981 г. эксплуатация установки прекращена из-за высокой стоимости брикетов.

**Аш-айрон-процесс** — восстановление железорудного концентрата водородом при конверсии природного газа в кипящем слое. Процесс разработан фирмами «Hydrocarbon Research Inc.» и «Bethlehem Steel Co.» (США). В 1953 г. процесс осуществлен в полупромышленном масштабе на установке в Трентоне (США) производительностью 7 т/сут. В 1960 г. пущен первый промышленный трехподовый реактор с кипящим слоем производительностью 50 т/сут. В 1961 г. в Лос-Анжелесе (США) пущен второй промышленный реактор производительностью 110 т/сут. В настоящее время оба реактора остановлены.

**Ониа-новальфер-процесс** — получение железного порошка восстановлением мелких фракций богатой руды в кипящем слое смесью  $CO$  и  $H_2$ , получаемых способом парокислородной конверсии природного газа. Процесс разработан в 1952 г. фирмой «Ониа» (Франция). В 1958 г. в Тулузе пущена установка мощностью 10 т/сут, затем сооружена установка производительностью 30 и 60 т/сут. Губчатое железо со степенью восста-

новления 75–95% использовалось при выплавке качественной стали и производстве железного порошка. Процесс не получил развития из-за высоких удельных энергозатрат.

### Процессы получения чугуна

Процесс Corex (рис. 4) разработан фирмами «Korf Engineering» (Германия) и «Voest Alpine» (Австрия) и запатентован «Voest Alpine». Первая установка (Corex-1000) производительностью 315 тыс. т чугуна введена в конце 1989 г. на заводе фирмы «Isco» в Претории (ЮАР) [3].

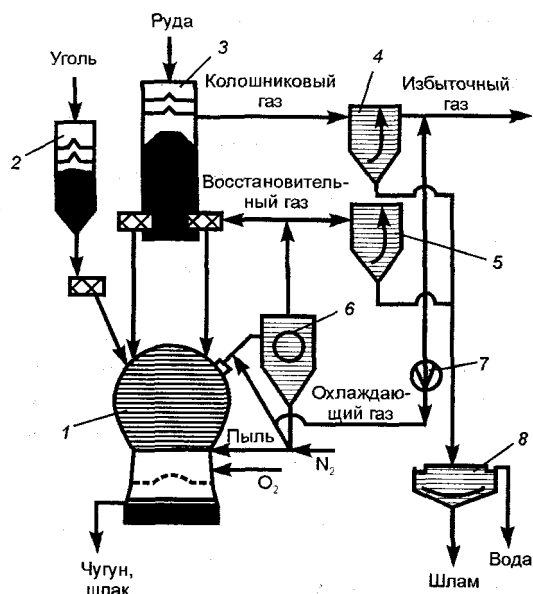


Рис. 4. Технологическая схема процесса Corex: 1 – реактор-газификатор; 2 – угольный бункер; 3 – шахтная печь; 4 – скруббер колошниковых газов; 5 – водяной холодильник; 6 – циклон; 7 – нагнетатель; 8 – сгуститель

Установка Corex представляет собой практически доменную печь, разделенную на два агрегата. Предварительное твердофазное восстановление окискованного железосодержащего сырья осуществляется в шахтной печи (в течение 7–9 ч) отходящим газом из плавильной камеры. Степень металлизации составляет около 93%. Затем через герметичную загрузочную систему уголь и горячий продукт подаются сверху в плавильный реактор-газификатор, в котором происходит плавление губчатого железа и окончательное восстановление оксидов железа из шлака, в основном углем.

Преимущество процесса Corex состоит в том, что можно использовать руду и угли практически любого качества, не требуется большое количество коксующихся углей, которые сейчас становятся очень дефицитными, а также в процессе образуется избыточный газ в количестве более 2 тыс. м<sup>3</sup>/т чугуна с теплотой сгорания 6,7–8,0 МДж/м<sup>3</sup>, который может быть использован в качестве свободного энергоносителя. Расход угля составляет 1,15–1,2 т/т чугуна.

Вместе с тем, по мнению авторов [1], недостатками процесса Corex являются необходимость

загрузки в реактор кокса, расход которого может достигать 15% от расхода угля, но главное, металлизированное окискованное сырье из шахтной печи подается в реактор – чугуноплавильный агрегат с получением чугуна и необходимостью его последующей переработки в сталь.

Однако анализ работы пяти функционирующих модулей Corex (одного – на заводе фирмы «Posco» (Южная Корея), двух – на заводе «Jindal» (Индия), по одному – на заводе «Saldanha Steel» и «Isco» (ЮАР)) показал, что процесс Corex является проверенной альтернативой для традиционного доменного производства [10].

На заводе «Saldanha Steel» (ЮАР) используется шихта, содержащая 90% кусковой руды и 10% окатышей, избыточный газ из модуля Corex используется для получения губчатого железа на соседней шахтной печи прямого восстановления Midrex. Передельный чугун с модуля Corex и губчатое железо используют для получения высококачественной стали в дуговой сталеплавильной печи и последующего производства на МНЛЗ тонких слябов с совмещенной прокаткой на стане горячей прокатки полосы.

На заводе «Jindal» (Индия) получаемый передельный чугун передают в сталеплавильное отделение, включающее два 120-тонных конвертера и две одноручьевые слябовые МНЛЗ. После разливки на МНЛЗ организован горячий посад слябов в печь с шагающими балками, которая расположена перед станом горячей прокатки полосы. Часть избыточного газа используется для производства окатышей на установке окомкования, остальная – на выработку электроэнергии.

Передельный чугун на заводе фирмы «Posco» (Южная Корея) используется в кислородно-конвертерном цехе LD, а избыточный газ из модуля – для выработки электроэнергии.

Для снижения эксплуатационных затрат фирма «Voest Alpine» предлагает современные разработки, включая загрузку в модуль отходов и материалов после рециклинга и (или) альтернативных сырьевых материалов, в частности, мелкие отходы металлургического производства, таких, как пыль, шламы, промасленная прокатная окалина, стружка черных металлов, а также органических остатков, включая пластмассы и измельченные автомобильные шины.

Так, установка Corex производительностью до 1 млн. т чугуна в год может утилизировать все типичные отходы и материалы после рециклинга от металлургического завода производительностью 3–4 млн. т стали в год.

Процесс ITmk3 является, по мнению авторов [3], перспективным процессом прямого восстановления железорудного сырья углем в печах с вращающимся подом. Технология разработана компанией «Kobe Steel» (Япония) (владелец технологии Midrex) и обеспечивает одностадийное

производство чугуна с качеством, близким к доменному (рис. 5). Процесс реализован на демонстрационной установке на заводе в Миннесота (США). В печь с вращающимся подом загружают рудоугольные окатыши, полученные окомкованием смеси концентрата и энергетического

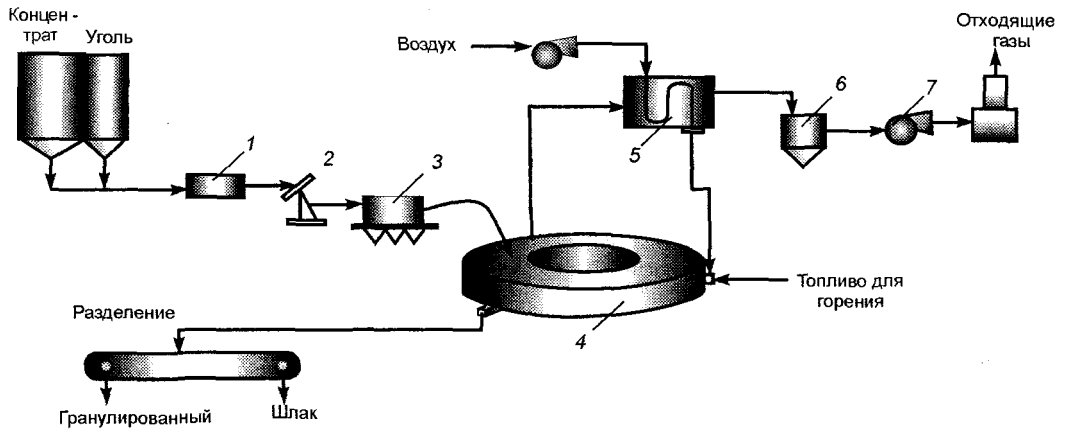


Рис. 5. Схема процесса ITmk3: 1 – смеситель; 2 – окомкователь; 3 – сушилка; 4 – печь с вращающимся подом; 5 – система утилизации теплоты; 6 – газоочистка; 7 – вентилятор

угля, нагревают до 1350–1450 °С, что обеспечивает возможность эффективного отделения чугуна от жидкого низкожелезистого шлака, который образуется внутри окатышей еще до расплавления металла. Весь процесс занимает около 10 мин. Конечным продуктом является гранулированный чугун.

К преимуществам процесса ITmk3 относятся высокая скорость восстановления (доменная плавка длится около 8 ч, традиционный процесс получения металлизированных окатышей в шахтных печах Midrex и HYL-ZR требует около 6 ч); возможность получения чугуна из руд с относительно низким содержанием железа; низкие затраты на производство чугунных гранул, так как в качестве топлива используется уголь.

Процесс HISmelt (рис. 6) предложен разработчиками (компаниями «Rio Tinto», «Nucor», «Mitsubishi Corp.», «Shougang Corp.») как двухстадийный процесс с нагревом и последующим расплавлением мелкой руды и металлургических пылей [3]. Первая промышленная установка производительностью 820 тыс. т чугуна в год построена в Квинане (Австралия).

Жидкофазное восстановление железа происходит в вертикальном цилиндрическом реакторе, который соединен с отстойником металла узким перетоком. Слив шлака организован непосредственно из нижней части шлаковой ванны. Железосодержащие материалы, дробленый уголь и флюс инжестируются струями азота в ванну через водоохлаждаемые фурмы. Необходимый тепловой режим плавки обеспечивается в основном дожиганием горючих газов.

**Альтернативные процессы получения жидкого чугуна**

Процесс Finex [5] является разработкой фирмы «Voest Alpine». По словам представителей фирмы

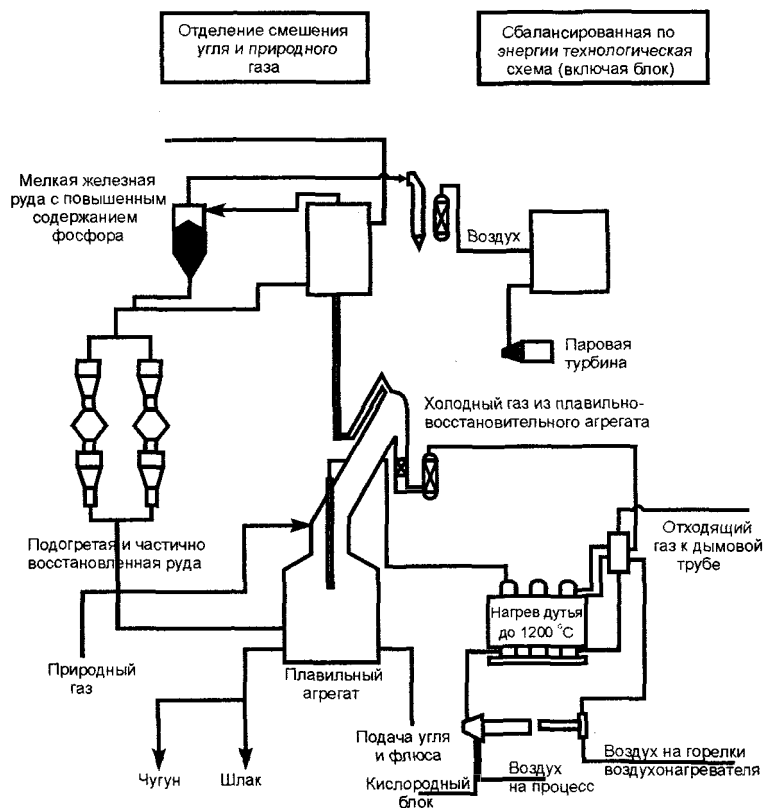


Рис. 6. Схема технологии HISmelt

«Voest Alpine», процесс плавки-восстановления железа по технологии Finex вызывает в настоящее время у металлургов наибольший интерес. Технология Finex предусматривает получение высококачественного жидкого металла непосредственно из загружаемой рудной мелочи, восстанавливаемой до железа прямого восстановления в несколько последовательно расположенных ретортах с кипящим слоем. Восстановленное железо расплавляют в отдельных плавильных газификаторах, использующих в качестве энергоносителя уголь. Получаемый продукт (жидкий горячий металл) по качеству соответствует металлу, выплавляемому в доменной печи или по технологии Corex.



Процесс Ромелт [1] представляет собой одностадийное жидкофазное получение чугуна и прошел длительное промышленное испытание на Новолипецком металлургическом комбинате. В качестве шихты используют железосодержащие материалы, уголь и флюс, которые загружают совместно в непрерывном процессе, и не требуют предварительного смешения.

В СССР разработка этого процесса начата МИСиС в конце 70-х годов, освоение производилось специальной лабораторией МИСиС и НЛМК в течение 1985–1986 гг. Доказаны осуществимость одностадийного процесса жидкофазного восстановления и работоспособность конструкции агрегата. Разработана промышленная технология жидкофазного восстановления различных железосодержащих материалов. В условиях экономической ситуации в России МИСиС начал коммерциализацию процесса Ромелт путем продажи лицензий фирмам Японии, США, Индии.

Получаемый на установке Ромелт чугун по составу соответствует доменному чугуну, однако содержание в нем кремния и марганца не превышает 0,15%. Это позволяет более эффективно перерабатывать его в сталь ввиду уменьшения образования при этом шлака. Отсутствие необходимости предварительно подготавливать железосодержащую шихту в агрегате Ромелт принципиально отличает его от двух и более стадийных процессов типа Corex. Дополнительным преимуществом является возможность работать на шихте с пониженным содержанием железа в пределах 45–55%.

Вместе с тем в настоящее время широкой промышленной реализации процесс Ромелт не получил.

Многофункциональный плавильный агрегат ПВЖВ (плавка с вращением и жидкофазным восстановлением), основная особенность которого – переработка шихты в условиях постоянного вращения выплавляемого металлического расплава и шлака за счет бегущего электромагнитного поля [1]. Способ ПВЖВ позволяет перерабатывать разные шихтовые материалы из оксидов железа, хрома, никеля. Предназначен для производства чугуна, высокоуглеродистого феррохрома, никельсодержащего чугуна, ферроникеля. Может комбинироваться с МНЛЗ, в том числе для литья трубных заготовок.

### Анализ технологий бескоксовой металлургии

Выполненный анализ технологий бескоксовой металлургии показывает, что наиболее изученными и промышленно освоенными процессами являются производство металлизированных окатышей по технологии Midrex и получение жидкого чугуна с использованием технологии Corex. В качестве перспективных технологий получения жидкого чугуна целесообразно рассматривать также процессы NYL-ZR, HISmelt, ITmk3.

Результаты расчетов себестоимости металла по различным технологиям с учетом удельных капитальных затрат на строительство установок, расходных норм для сырья и энергоресурсов, усредненных для условий России, приведены в табл. 3 [3].

Таблица 3. Результаты расчетов ориентировочных капитальных затрат на строительство установок

Процесс	Годовая мощность установки, тыс.т	Капитальные затраты на строительство установки, млн. долл.
NYL-ZR	2000	307
Midrex	1800	350
Corex-3000	1400	368
HISmelt	820	200
ITmk3	500	150

При этом, как отмечают авторы [3], доля затрат на топливо в структуре себестоимости доменного чугуна составляет около 50%, а для процессов NYL-ZR, ITmk3, Midrex – 10–15%. Это обеспечивает более слабую зависимость себестоимости производимого этими процессами металлизированного сырья и жидкого чугуна от цен на топливо.

В работе [3] приведена ориентировочная оценка себестоимости товарной продукции для альтернативных методов получения железа, выполненная для условий России, долл. США/т: доменная печь – 180; Corex – 75, ITmk3 – 80; NYL-ZR – 95–100; Midrex – 105–110, HISmelt – 125–130.

При анализе капитальных затрат и себестоимости авторы [3] выделили три группы процессов:

1) наиболее эффективная (низкие капитальные затраты и низкая себестоимость) – Midrex и NYL-ZR;

2) средняя по эффективности (высокие капитальные затраты и низкая себестоимость) – Corex и ITmk3;

3) низкая по эффективности (высокие капитальные затраты и высокая себестоимость) – HISmelt и доменная печь.

### Основные направления переработки железных руд Беларуси

Как отмечалось ранее, Департаментом по геологии Республики Беларусь выполнены предварительные расчеты о возможности использования железных руд страны. При этом обоснована технологическая схема получения железорудного сырья на базе создания горно-перерабатывающего комплекса и доказана возможность переработки железных руд в высококачественное металлизированное сырье. Это подтверждается изготовлением опытных образцов металлизированных окатышей

(из полученного магнетитового концентрата железных руд Околовского месторождения), при использовании которых осуществлены опытно-промышленные плавки стали на РУП «БМЗ»<sup>1</sup>.

Сырые окатыши из добытой железной руды изготавливались в лабораторных условиях, окислительный обжиг проводился в промышленных условиях на конвейерной обжиговой машине на Лебединском ГОКе. Процесс металлзации окатышей осуществлялся в промышленных условиях в шахтной установке Midrex Оскольского электрометаллургического комбината (ОЭМК).

Результаты анализа энерготехнологических показателей плавки и качества полученной металлопродукции показали, что металлзованные окатыши полностью соответствуют требованиям промышленной технологии РУП «БМЗ».

Сопоставительный анализ окатышей, полученных из железной руды Околовского месторождения, с окатышами, изготовленными крупнейшим производителем окатышей в России ОЭМК, показал, что степень металлзации окатышей на базе руд

Околовского месторождения на 1% выше, чем ОЭМК, способность к науглероживанию – одинаковая. В целом окатыши Околовского месторождения по восстановимости и содержанию железа превосходят окатыши ОЭМК, по прочностным характеристикам – сопоставимы.

Горно-перерабатывающий комплекс включает в себя подземный рудник, обогатительную фабрику (в непосредственной близости от месторождения), фабрику окомкования для получения окисленных окатышей и цех по производству металлзованных окатышей или жидкого чугуна. Последний объект должен располагаться на промплощадке металлургического завода для производства готовой продукции.

Способ разработки месторождения – шахтный, глубина отработки запасов – 500–600 м. Способ обогащения железорудного сырья: дробление до 30–40 мм, сухая магнитная сепарация дробленой руды, три стадии измельчения хвостов и сухой магнитной сепарации и мокрое магнитное обогащение. Основные показатели горно-обогатительного комплекса приведены в табл. 4.

Таблица 4. Показатели производства горно-обогатительного комбината (на примере Околовского месторождения)

Наименование показателей	Величина
<b>Основная продукция</b>	
Годовая производительность обогатительной фабрики по руде, тыс.т	4000
Срок эксплуатации	39,5
Годовой объем производства железорудного концентрата (содержание железа общего 70,24%), тыс.т	789,2
Годовой объем окисленных окатышей из концентрата (содержание железа общего 68,0%), тыс.т	815,2
Годовой объем металлзованных окатышей (содержание железа общего 93,8%), тыс.т	572,3
<b>Побочная продукция</b>	
Годовой объем строительного щебня, тыс.т	663,5
Годовой объем строительного песка, тыс.т	215,0

При использовании металлзованного сырья или чугуна для условий Республики Беларусь рассмотрены две схемы получения готовой продукции (непрерывнолитой слябовой заготовки) (рис. 7).

1. Установка Midrex – электросталеплавильный комплекс – установка внепечной обработки – литье заготовок (МНЛЗ) и т.д., при этом возможно создание горно-обогатительного комплекса и установки Midrex с целью производства окатышей для сталеплавильного производства РУП «Белорусский металлургический завод» и иных сталеплавильных и чугунолитейных агрегатов.

2. Установка Cogex – конвертер – установка внепечной обработки – МНЛЗ и т.д.

Основные технико-экономические показатели предлагаемых технологических схем приведены в табл. 5.

Каждая из приведенных схем имеет свои преимущества и недостатки.

#### Midrex

**Преимущества:** производство высококачественного металлзованного сырья и высококачественных марок стали.

**Недостатки:** необходимость использования природного газа в объеме 200–300 тыс. т у.т. при производстве 500–600 тыс. т металлзованных окатышей в год.

#### Cogex

**Преимущества:** независимость от поставок природного газа (при производстве чугуна в установке Cogex используется уголь, в том числе возможно использование бурых углей, при

<sup>1</sup> В проведении работы принимали участие канд. техн. наук Ю.В. Феоктистов, А.А. Терлсеев, А.П. Фоменко, Ю.И. Корченев и др.

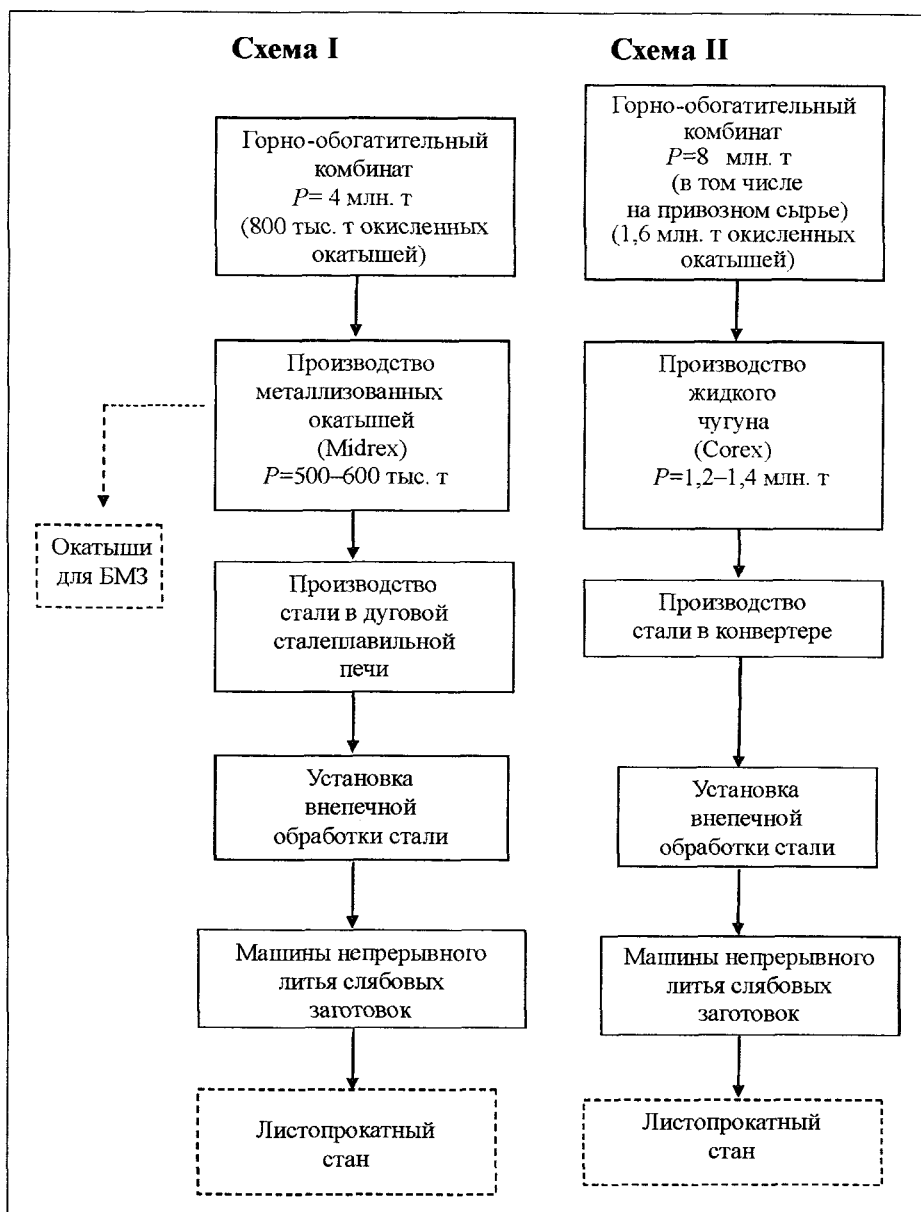


Рис. 7. Схемы получения готовой продукции (непрерывнолитой слябовой заготовки)

Таблица 5. Технико-экономические показатели схем использования железорудного сырья

Процесс	Стоимость, млн. долл. США	Выручка от реализации, млн. долл. США	Срок окупаемости, лет
Горно-обогатительный комплекс и установка Midrex для производства металлизированных окатышей производительностью 600 тыс. т/год	900-950	105-110	8,0-8,5
Горно-обогатительный комплекс и установка Midrex для производства металлизированных окатышей производительностью 1200 тыс. т/год	950-1000	170-180	5 - 6
Горно-обогатительный комплекс, установка Midrex, ДСП и МНЛЗ для производства слябов производительностью 500 тыс. т/год	1200	100-120	10-11
Горно-обогатительный комплекс, установка Midrex, ДСП и МНЛЗ для производства слябов производительностью 1000 тыс. т/год	1300	190-200	6-7
Горно-обогатительный комплекс, установка Corex, конвертер, МНЛЗ для производства слябов производительностью 1000 тыс. т/год	1400-1500	180-200	4-5



производстве стали в конвертере используется кислород); при производстве жидкого чугуна образуется колошниковый газ (при производительности 1,2–1,4 млн. т чугуна/год дополнительно образуется ТЭР на уровне 500–550 тыс. т у.т.); возможность использования отходов металлургического, машиностроительного и других производств (окалина, стружка, шлам, автомобильные шины и т.д.).

**Недостатки:** необходимость закупки обычных и коксующихся углей и дополнительного количества железной руды (на уровне 4 млн. т/год при содержании железа ~25%).

Для окончательного принятия решения о выборе альтернативной технологии получения сырьевого железа (окатышей, брикетов, чугуна) необходим учет взаимосвязанных факторов экономического характера, наличия местных сырьевых ресурсов, конъюнктуры мирового рынка черных металлов, специфики требований, предъявляемых в качестве железорудной шихты и т.д.

### Выводы

1. Выполнен анализ мирового уровня технологического развития и освоения процессов бескоксовой металлургии (производства металлизированных окатышей, горячбрикетированного железа и чугуна) при использовании современных технологий и осуществлена классификация альтернативных методов получения чугуна и стали, выявлены также преимущества и недостатки предлагаемых технологий на примере процессов Midrex и Cogex.

2. Доказана возможность получения из железорудного сырья металлизированных окатышей на базе Околовского месторождения (Минская область), не только соответствующих требованиям промышленной технологии Белорусского металлургического завода, но по своим качествам превосходящих окатыши, производимые ведущим металлургическим предприятием этого типа в СНГ – Оскольским электрометаллургическим комбинатом.

3. Рассмотрены технические направления модернизации металлургического производства Республики Беларусь для производства импортозамещающей металлопродукции (на примере листопрокатного производства) на базе создания новых производственных мощностей, включая переработку собственного железорудного сырья. Проанализированы наиболее экономичные схемы производства полупродукта (по капитальным затратам и себестоимости производимой продукции), предусматривающие получение металлизированных окатышей (технология Midrex) и жидкого чугуна (технология Cogex).

4. Выполнен ориентировочный расчет технико-экономических показателей производства непрерывнолитых слябовых заготовок при использовании технологий получения полупродукта на базе процессов Midrex и Cogex, который показал, что наиболее экономичным является производство непрерывнолитых слябов (в перспективе листопрокатной продукции) на базе получения жидкого чугуна по технологии Cogex по следующим параметрам:

- независимость от поставок природного газа (при производстве чугуна используется уголь, в том числе возможно использование бурых углей);
- воспроизводство свободного энергоносителя на уровне 500–550 тыс. т у.т. при производительности 1,2–1,4 млн. т чугуна/год;
- возможность утилизации отходов металлургического и машиностроительного производства (стружка черных металлов, шлам, пыль, окалина, автомобильные шины, пластмассы).

5. Представленные в статье материалы являются новыми для Республики Беларусь и весьма актуальными для решения проблемы максимального использования железорудного сырья белорусских месторождений с целью создания в дальнейшем собственной горно-металлургической отрасли в стране, что, по нашему мнению, требует всестороннего рассмотрения и обсуждения на высшем государственном уровне.

### Литература

1. Лисиенко В.Г., Щелоков Я.М., Ладыгичев М.Г. Топливо. Рациональное сжигание, управление и технологическое использование. Спр. в 3-х кн. Кн.2. М.: Теплотехник, 2004.
2. Крячко Г.Ю. К вопросу о развитии доменного производства // Сталь. 2003. №5. С. 7–11.
3. Принципы выбора технологии прямого получения железа / В.А. Горбачев, С.Н. Евстюгин, Н.Н. Копоть и др. // Сталь. 2006. №6. С. 42–46.
4. Щедрин В.М. Основы альтернативной металлургии железа: теоретические и экспериментальные предпосылки // Сталь. 2001. № 12. С. 8–13.
5. Голд Л. Примеры новых технологий фирмы VAI для черной металлургии // Черные металлы. 2005. Февраль. С. 76–83.
6. Обзор прессы по металлургической тематике // Д. Ярославский. Деловая столица. 2005. №12. 21 марта.
7. Процесс ХИЛ-III: первый опыт в России и перспективы его развития / В.А. Горбачев, Н.Н. Копоть, М. Маттуш, Л.И. Леонтьев // Сталь. 2003. №1. С. 8–10.
8. Подача подогретого природного газа в конус реактора ХИЛ-III – резерв его стабильной работы / Н.Н. Копоть, В.А. Горбачев, Ю.А. Крымов, Г.Г. Розенко // Сталь. 2003. №9. С. 26–27.
9. Мартинис А., Франко Б., Улла А., Тавано А. «Danagex» как перспективный процесс прямого восстановления железа // Сталь. 2004. №8. С. 12–13.
10. Современное состояние технологий COREX и новые разработки / А. Эберле, Д. Зиука, К. Беём, В. Шиффер (информация фирмы VAI) // Черные металлы. 2003. Ноябрь. С. 59–64.