

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

КАФЕДРА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

ТЕРЕХОВА Анастасия Юрьевна

ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И
РАБОТЫ ПЕЧЕЙ С БАРБОТАЖНЫМ СЛОЕМ ДЛЯ ЖИДКОФАЗНОГО
ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА

Специальность 2.6.2 – Metallургия черных, цветных и редких металлов

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
д.ф.–м.н, профессор Петелин А.Л.
Научный консультант:
д.т.н., профессор Сборщиков Г.С.

Москва – 2022

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В России и во всем мире практически исчерпаны запасы железных руд с высоким содержанием железа. Повсеместно в производство вовлекаются все более бедные руды, в которых содержание сопутствующих ценных компонентов таково, что эти руды переходят в категорию комплексных и для их переработки необходимо разрабатывать технологические процессы комплексного извлечения полезных компонентов. В сложившейся ситуации все большее внимание привлекают техногенные отходы металлургии, энергетики, стройиндустрии, а также коммунальные отходы, содержание железа в которых существенно выше, чем в исходной руде. Переработка подобного сырья требует создания технологических процессов и аппаратов, альтернативных доменной плавке. В принципе в доменной печи можно перерабатывать и получить первичный металл из любого железосодержащего сырья. Однако, требования к его первичной подготовке и к первичной подготовке кокса заставляют искать альтернативные решения.

К настоящему моменту в мире разработано много схем внедоменного получения первичного металла. Одной из них является разработанный в России процесс Ромелт. В этом процессе реализована одностадийная схема «плавление–восстановление». С точки зрения металлургической теплотехники печь Ромелт является универсальным плавильным агрегатом и обладает большими потенциальными возможностями. В данной работе предпринята попытка разработать ряд мероприятий повышающих технико-экономические показатели печей жидкофазного восстановления типа Ромелт.

Цель работы определить факторы, мешающие повысить удельную производительность печи и снизить удельные энергозатраты на производство тонны чугуна в печи жидкофазного восстановления.

Задачи работы сформулированы следующим образом:

1. Выполнить физико–химический анализ процесса плавки исходного сырья в печи жидкофазного восстановления с целью определения оптимальной температуры ванны и концентрации кислорода в дутье на нижних фурмах и в зоне дожигания.
2. Выполнить теплофизический анализ тепловой работы печи с целью определения возможности сократить расход топлива в печи.
3. Разработать рекомендации по усовершенствованию процесса и печи жидкофазного восстановления.

Научная новизна исследования:

1. Установлено, что в печах жидкофазного восстановления железа типа Ромелт основной причиной, обуславливающей высокие удельные энергозатраты и ограниченную удельную производительность, является выбранная схема обогрева ванны расплава, предусматривающая частичное сжигание топлива в расплаве и дожигание продуктов неполного горения в надслоевом пространстве. С одной стороны, она обуславливает необходимость подачи технического кислорода в надслоевое пространство для поддержания в нем сверхвысокой температуры, определяющей количество теплоты, передаваемой из зоны дожигания в ванну расплава, а с другой - подачу технического кислорода в барботажный слой для интенсификации погружного горения топлива в нем. Передача теплоты из надслоевого пространства на поверхность барботажного слоя создает неравномерное температурное поле в нем. Для исключения указанных недостатков предлагается исключить существующую схему обогрева ванны и вынести процесс сжигания топлива за пределы рабочего пространства печи, а продувку ванны осуществлять высокотемпературными продуктами сгорания. Это позволит исключить применение в процессе плавки технического кислорода.

2. Установлено неполное использование объема барботажного слоя в процессе плавки. Только половина его объема активно участвует в процессах теплообмена. Причиной этого является особенность пневматического перемешивания ванны. Для улучшения качества перемешивания ванны необходимо перейти к струйному режиму ее продувки.

3. Установлено, что в печах жидкофазного восстановления с погружным горением топлива и дожиганием продуктов неполного сгорания в надслоевом пространстве типа Ромелт уменьшение удельного расхода технического кислорода возможно только за счет сокращения степени дожигания отходящих газов в надслоевом пространстве. Величина такого сокращения при этом определяется количеством теплоты, которое можно передать с дутьем через нижние фурмы в расплав за счет предварительного подогрева дутья.

Теоретическая значимость:

1. Выявлены и исследованы фундаментальные причины, обуславливающие высокую энергозатратность и ограниченную удельную производительность процесса жидкофазного восстановления в изучаемой печи.

2. Показана принципиальная возможность без ущерба для технологического процесса уменьшить (в пределах до полного исключения) количество применяемого

технического кислорода в рабочем пространстве печи и понизить сверхвысокие температуры в ее надслоевом пространстве.

3. Разработана модель теплообмена между барботажным слоем и надслоевым пространством печи.

Практическая значимость:

1. Для базового образца

1.1. Разработаны рекомендации, позволяющие сократить удельный расход технического кислорода на тонну произведенного чугуна на 11 %, а удельный расход теплоты на 13 %.

1.2. Предложена альтернативная схема использования физической и химической теплоты отходящих из печи газов. Реализация указанной схемы позволит вернуть в ванну печи до 77 % теплоты этих газов.

2. Для агрегатов, создаваемых вновь

2.1. Рекомендовано изменить режим продувки печи, перейдя с переходного режима на струйный, что позволит вдвое увеличить ее удельную производительность по перерабатываемому сырью.

2.2. Предложено исключить сжигание топлива в расплаве и дожигание отходящих газов в надслоевом пространстве печи. Это позволит не понижая производительность печи исключить применение технического кислорода и снизить температуру в ее надслоевом пространстве до уровня температуры ванны, что резко снизит тепловые нагрузки на верхнее строение печи и сократит потери теплоты с отходящими газами и в системе принудительного охлаждения печи, а также уменьшит степень химического недожога в этих газах.

2.3. Рекомендовано сжигать топливо в топках, установленных на печи вместо фурм. Это позволит осуществлять управляемый процесс сжигания топлива любого качества и состава с получением продуктов сгорания необходимого химического состава и с заданной температурой.

2.4. Рекомендовано использовать продукты сгорания для реализации струйного режима продувки. С этой целью снабдить топку соплами с калиброванными выходными отверстиями.

2.5. Рекомендовано использовать ограждения верхнего строения печи в качестве воздухоподогревателя. С этой целью применить стальные ошипованные кессоны с огнеупорной набивкой.

2.6. Предложена принципиальная схема организации процесса жидкофазного восстановления железа с модифицированной печью с барботажным слоем и системой утилизации теплоты отходящих газов.

3. Разработаны рекомендации для проектирования агрегата с барботажным слоем с выносными камерами сгорания для переработки железорудного материала для ООО «МетПромСтрой», ООО «НОРД Инжиниринг»

Методология и методы научного исследования

Методология – цифровое комплексное исследование

Методы научного исследования

1. Анализ литературы и выбор базового образца для исследования процесса внедоменного получения первичного железа
2. Деление базового образца на объекты исследования и формулирование для каждого из них условий однозначности
3. Цифровое исследование работы каждого объекта в плане решения задач, поставленных в данной работе
4. Анализ результатов цифровых экспериментов с выявлением факторов, препятствующих достижению поставленных целей. Разработка рекомендаций по их нейтрализации.

Положения, выносимые на защиту:

1. Рекомендации по изменениям в технологическом режиме и конструкции печи жидкофазного восстановления.
2. Математическое описание процесса теплообмена в зоне дожигания действующей печи.
3. Новая технологическая схема процесса жидкофазного восстановления и аппарат для ее реализации.

Степень достоверности: Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием фундаментальных законов природы при построении математических моделей, большим числом итераций, реализуемых при получении каждого результата численного эксперимента, а также хорошим согласованием этих результатов с данными по эксплуатации базового образца.

Апробация работы

Материалы диссертации доложены и обсуждены на следующих конференциях:

1. Улучшение показателей работы печи с барботажным слоем за счет оптимизации конструкции и гидродинамического режима / Терехова А.Ю., Володин А.М., Валавин В.С. 18-я всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и специалистов "Энергетики и металлургии настоящему и будущему России", 23–25 мая 2017 г., г. Магнитогорск.

2. Процессы внедоменного производства чугуна. Состояние вопроса / Терехова А.Ю. Сборник материалов IX Международной научно-практической конференции "Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология", 12–14 декабря 2018 г., Москва, МИСиС

3. Разработка оптимальной конструкции и гидродинамического режима для печей с барботажным слоем / Терехова А. Ю. VII международный инновационно-промышленный форум «Технологический прорыв. Пространственное развитие России», 28 ноября 2018 г., г. Москва

4. Разработка оптимальной конструкции и гидродинамического режима для печей с барботажным слоем / Терехова А. Ю. XVI международный конгресс сталеплавильщиков, и производителей металла ISCON – 2021. 24–27 мая 2021 г., г. Екатеринбург.

5. Результаты работы были представлены на конкурсе “Молодые ученые” XXV Международной выставки МЕТАЛЛ-ЭКСПО’20 (Россия, Москва, 2020 г.) с проектом “Влияние концентрации кислорода в дутье, подаваемом в слой, и температуры слоя на удельную производительность печи Ромелт” (награждена Дипломом лауреата конкурса за научную работу).

6. Результаты работы были представлены на конкурсе “Молодые ученые” XXVI Международной выставки МЕТАЛЛ-ЭКСПО’21 (Россия, Москва, 2021 г.) с проектом “Исследование и совершенствование конструкции и работы печей с барботажным слоем для жидкофазного восстановления железа” (награждена Дипломом лауреата конкурса за научную работу).

Публикации

Основные результаты диссертации представлены в 3 статьях в высокорейтинговых научных журналах, входящих в список ВАК, 14 тезисах докладов российских и международных научных конференций, также по материалам работы зарегистрированы 2 свидетельства на регистрацию программ для ЭВМ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации и дана общая характеристика работы. Изложены цели и задачи.

В первой главе проанализированы известные разработки технологических процессов внедоменного получения первичного металла.

Все процессы можно разделить на две группы:

1. Процессы “восстановление-плавление”, в которых твердофазное восстановление, протекающее в низкотемпературной зоне доменной печи, и плавление и разделение металлической и шлаковой фаз, протекающие в высокотемпературной зоне, реализуются в различных технологических аппаратах.

2. Процессы “плавление-восстановление”, в которых все технологические процессы получения первичного металла протекают в ванне расплава одного технологического аппарата. Это процессы жидкофазного восстановления. Наиболее уязвимыми позициями процессов жидкофазного восстановления являются высокие удельные расходы кислорода и топлива. Исходя из этого были сформулированы задачи настоящей работы.

Во второй главе изложены результаты исследования работы печи жидкофазного восстановления железа. В качестве объекта исследования (базового образца) приняты процесс и печь Ромелт, т. к. это единственный известный нам агрегат жидкофазного восстановления, прошедший опытно-промышленные испытания, о работе которого имеется достаточный объем информации в открытой печати.

Печь, согласно описанию ее авторов, была разделена на три зоны: барботажный слой, подфурменная зона, надслоевое пространство. Во всех зонах были выполнены физико-химические исследования. Теплофизические исследования в подфурменной зоне не проводились, т.к. теплофизика этой зоны не оказывает существенного влияния на решение задач, поставленных в данной работе.

Физико-химические исследования работы печи с барботажным слоем. Исследование выполнено с помощью программы ИВТАНТЕРМО и модели горения газообразного топлива. Барботажная зона рассматривается как проточный реактор. Используется метод классической термодинамики, который назван методом последовательных равновесий. Этот метод предполагает введение мгновенного равновесия во всей реакционной системе в последовательном ряду дискретных моментов времени.

Считается, что газовые продукты (газы CO и CO₂) и восстановленный металл покидают реакционное пространство. Вследствие этого каждый шаг процесса вновь начинается со стартового состояния реакционной зоны, когда продуктов реакции еще нет, они еще не образовались. Такой способ расчета позволяет пошагово моделировать непрерывные потоки компонентов, которые проходят через систему, в результате чего систему можно считать открытой и неравновесной. В соответствие с этим при физико-химическом анализе барботажного слоя и подфурменной зоны приняты следующие основные допущения:

1. В обеих зонах рассматривается режим термодинамического равновесия.
2. Зона барботажного слоя работает в режиме аппарата идеального смешения.
3. Подфурменная зона работает в режиме аппарата идеального вытеснения.

Рассматривается плавка смеси шламов доменного и конвертерного производств, содержащей 51,3 % железа, с получением 35 т/ч чугуна. Расход кислородно-воздушной смеси на нижние фурмы со степенью обогащения дутья 60 %–15 000 нм³/ч. Расход технического кислорода на нижние фурмы 5850 м³/ч, расход технического кислорода в зоне дожигания 21 003 м³/ч. В плавке использован отсев угля 1СС Кузнецкого месторождения при влажности 8 %.

Температура металла в печи составляет 1400–1450 °С, шлака – 1440–1500 °С.

Температура уходящего из печи газа зависит от степени дожигания и составляет 1400–1700 °С.

Таблица 1 – Материальный баланс плавки (кг/ч)

Приход		Расход	
Уголь	25577	Чугун	35000
Железосодержащий материал	74945	Шлак	14808
Известь	489	Газ	97812
Кислород	40659	Пыль	3225
Воздух	9620	Примеси в газах	443

Зона барботажного слоя.

Изучалось влияние концентрации кислорода в кислородно-воздушной смеси и температуры ванны на процесс восстановления железа. При исследовании влияния кислорода в качестве параметров (т.е. констант) задавались расход технического кислорода в зону дожигания, химический состав компонентов плавки и температура ванны. В качестве независимой переменной выступала концентрация кислорода в нижнем

дутье при постоянном расходе последнего. При изучении влияния температуры ванны концентрация кислорода в дутье превращалась в параметр, а температура ванны – в независимую переменную. Пределы изменения переменных определяли, исходя из поведения функции (выхода ее на асимптоту) и здравого смысла. Концентрация кислорода в дутье изменялась от 13 до 40 %, а температура ванны от 1300 до 1450 °С.

Исследования зоны барботажа показали, что при вдувании в ванну дутья, содержащего более 30% кислорода, в ней не наблюдается заметного восстановления оксидов всех присутствующих металлов за исключением гематита, который при этом полностью переходит в вюстит. Появление равновесного восстановленного металлического железа, не наблюдается во всем исследованном интервале температур. При этом локальное восстановление металла при контакте оксидов с частицами угля происходит и вследствие этого образуется поток металла в подфурменную зону.

На рисунке 1 представлены зависимости степени равновесного восстановления железа от концентрации кислорода в дутье для различных температур. Из графиков видно, что чем меньше содержание кислорода в дутье, тем интенсивней процесс восстановления железа в ванне.

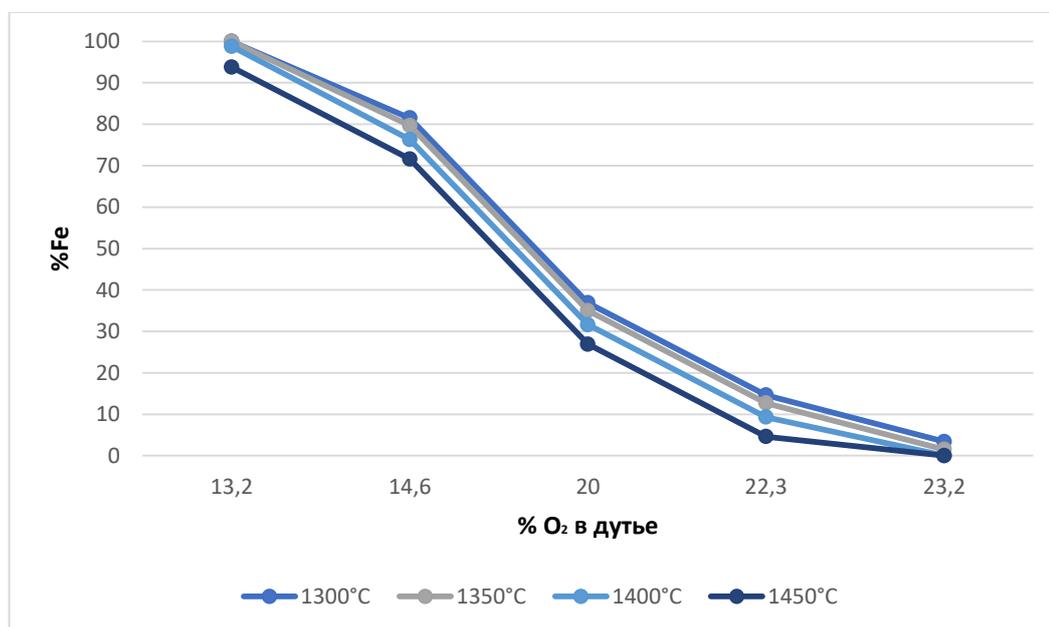
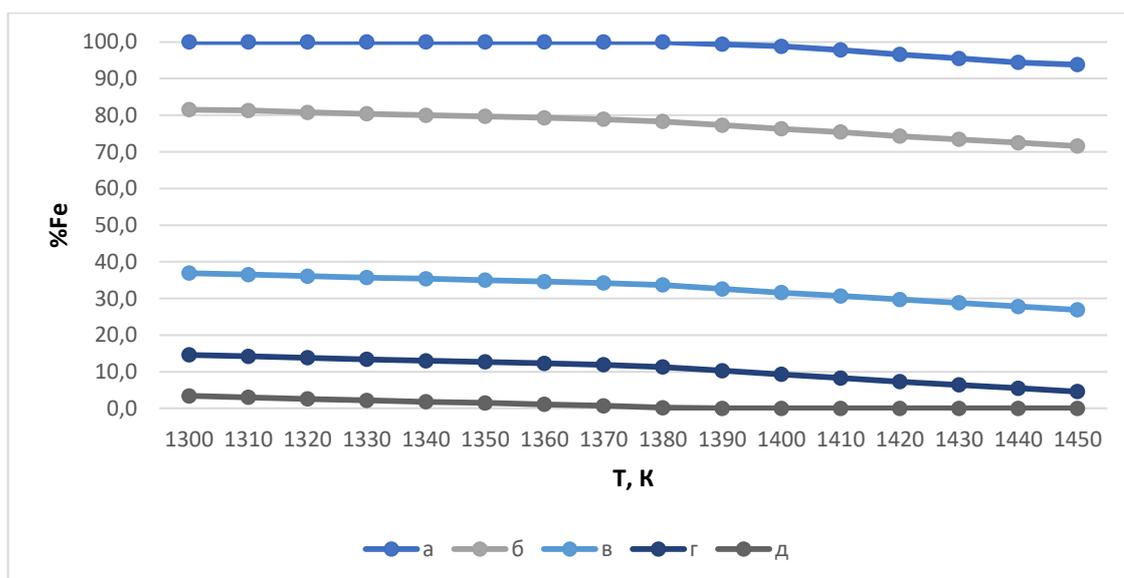


Рисунок 1 – Зависимость равновесной степени восстановления железа от концентрации кислорода в дутье для различных температур

Рисунок 2 демонстрирует зависимость степени восстановления железа от температуры при различных концентрациях кислорода в дутье.



а-13,2; б-14,6; в-20; г-22,3; д-23,2

Рисунок 2 – Зависимость степени восстановления железа от температуры при различных концентрациях кислорода в дутье

Из графика рисунка 2 видно, что при любой концентрации кислорода в дутье с ростом температуры восстановительный потенциал ванны снижается, что связано, возможно, с уменьшением скорости реакции газификации монооксида углерода при росте температуры.

Подфурменная зона в свою очередь делится на две части, зону спокойного расплава и зону металла.

Зона спокойного расплава заполнена оксидами металлов, которые попадают из зоны барботажа. Также здесь находится некоторое количество восстановленного металлического железа, которое, вследствие большей, чем у шлаковых соединений плотности, под действием силы тяжести проходит насквозь в нижерасположенную зону металла.

Окислительный потенциал этой зоны достаточно высок, и возможно вторичное окисление железа в течение времени его прохождения сквозь зону спокойного расплава в зону металла. Реальная степень окисления восстановленного железа в зоне спокойного расплава меньше равновесной. Это связано с тем, что время пребывания железа в этой зоне ограничено.

Зона металла

Анализ элементного состава зоны металла показал, что в этой зоне основу составляет железо – примерно 95 % (масс). Кроме того, там находится 4–5 % (масс.)

углерода. Углерод может попасть сюда только в связанном состоянии вместе с железом. Часть углерода входит в состав железной основы, образуя чугун. Остальной – избыточный углерод – находится в виде графита или другой углеродсодержащей фазы.

Внутри зоны металла химические процессы не происходят, состав зоны термодинамически устойчив.

Проведенный анализ показал следующее:

1. При работе в режиме идеального смешения и неизменных составах загружаемых шихты и топлива в барботажной зоне управляющим параметром процесса является содержание кислорода в дутье нижних фурм. При превышении его концентрации значения, определяемого термодинамическим расчетом для каждого состава шихты, форсирование плавки невозможно. При снижении содержания кислорода в дутье ниже указанного предела вплоть до нуля степень равновесного восстановления железа растет.

2. При работе печи в режиме идеального смешения не целесообразно повышать температуру расплава выше 1350 °С, т.к. это приводит к снижению восстановительной способности ванны.

3. Имеющее место восстановление железа в базовом процессе объясняется тем, что в ванне отсутствуют термодинамическое равновесие и режим идеального смешения.

4. Влияние подфурменной зоны в базовом образце печи на степень восстановления металла в барботажном слое незначительно.

Физико-химический анализ процесса дожигания отходящих газов в надслоевом пространстве печи

Как следует из материального баланса 73,85 % технического кислорода, расходуемого на получение тонны чугуна, подается в надслоевое пространство для дожигания газов, которые выходят из барботажного слоя. Именно в этой зоне следует искать возможность сократить удельный расход кислорода. При этом, для сохранения удельной производительности печи на уровне базовой плавки, температура в зоне дожигания должна быть не ниже, чем она была в базовой плавке. При таком условии минимизировать расход кислорода возможно, используя в качестве управляющих воздействий расход дутья в зоне дожигания, концентрацию кислорода в дутье и температуру дутья.

В качестве характеристической температуры в зоне дожигания приняли теоретическую температуру горения, T_T – это температура, которая развивалась бы в зоне

дожигания при заданной степени дожигания и условии, что процесс горения протекает адиабатно. Только эту величину, как температурную характеристику процесса дожигания, можно определить аналитически по данным базовой плавки.

Изучены четыре варианта дожигания отходящих газов: техническим кислородом (базовый режим); подогретым воздухом; дутьем, содержащим 60% кислорода; вариант с одновременным подогревом дутья, подаваемого на верхние и нижние фурмы.

В качестве математической модели дожигания отходящих газов использовали уравнение теплового баланса горения 1 м³ отходящих газов. Из этого уравнения определяли теоретическую температуру горения. Расход дутья учитывался через

коэффициент расхода дутья $n = \frac{V_{\partial}^{\phi}}{V_{\partial}^0}$, где V_{∂}^0 – стехиометрический расход дутья для сжигания 1 м³ отходящих газов, а V_{∂}^{ϕ} – его действительный расход.

$$Q_{y.g.}^{\phi} = V_{y.g.} \cdot c_{y.g.} \cdot T_T = Q_{o.g.}^x + i_{o.g.} + Q_{\partial}^{\phi} - Q_{y.g.}^x, \frac{\text{кДжкДж}}{\text{м}^3_{o.g.}\text{м}^3_{o.g.}} \quad (1)$$

где $Q_{y.g.}^{\phi}$ – физически связанная теплота газов, покидающих зону дожигания, кДж/м³_{o.g.}

$V_{y.g.}$ – объем продуктов сгорания, образующихся при дожигании 1 м³ отходящих газов с заданным значением n; м³/м³_{o.g.};

$c_{y.g.}$ – удельная теплоемкость уходящих газов, $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{°См}^3 \cdot \text{°С}}$;

T_T – теоретическая температура в зоне дожигания, °С;

$Q_{o.g.}^x$ – химически связанная теплота отходящих газов, поступающих в зону дожигания, $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3_{o.g.}}$

$i_{o.g.}$ – энтальпия газов, поступающих в зону дожигания, $\frac{\text{кДжкДж}}{\text{м}^3_{o.g.}\text{м}^3_{o.g.}}$;

Q_{∂}^{ϕ} – теплота, вносимая в зону дожигания дутьем, подаваемым для сжигания м³ отходящего газа, кДж/м³_{o.g.};

$Q_{y.g.}^x$ – химически связанная теплота газов, покидающих зону дожигания, $\frac{\text{кДжкДж}}{\text{м}^3_{o.g.}\text{м}^3_{o.g.}}$.

Для базового варианта дожигания отходящих газов холодным техническим кислородом ($\beta = 0,995$) получили:

Теоретическая температура в зоне дожигания

$$T_T = 3977 \text{ }^\circ\text{C}$$

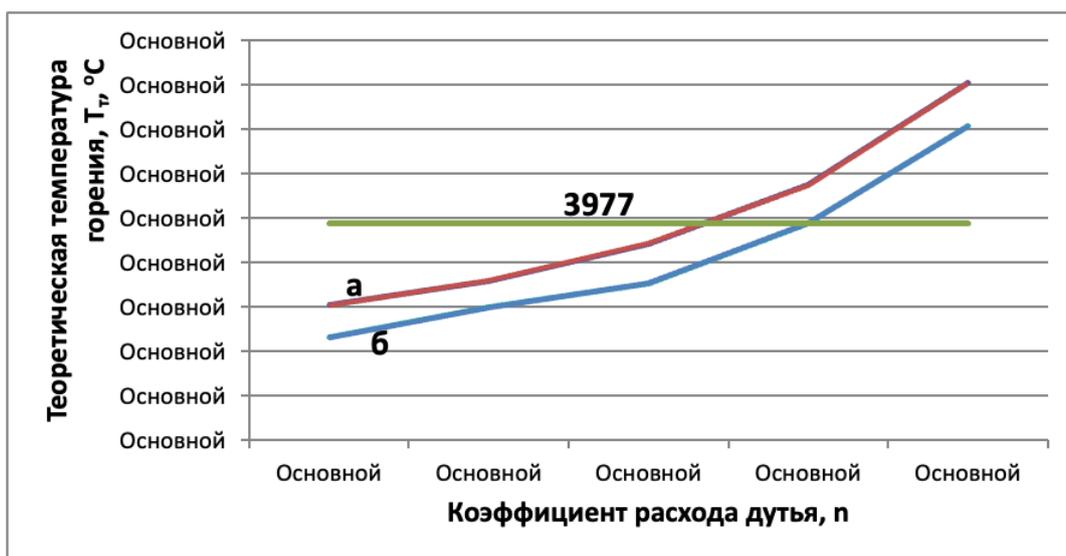
Степень дожигания отходящих газов

$$a_{\text{дож}} = \frac{Q_{\text{ог}}^x - Q_{\text{уг}}^x}{Q_{\text{ог}}^x} = 0,52$$

Во второй серии численных экспериментов проверили возможность замены технического кислорода подогретым воздухом. С этой целью рассчитали необходимый уровень подогрева воздуха. Он оказался выше $3000 \text{ }^\circ\text{C}$, что технически невозможно. Таким образом, при заданной производительности печи полный отказ от использования технического кислорода невозможен.

В третьей серии экспериментов исследовали возможность замены в зоне дожигания технического кислорода дутьем, содержащим 60 % кислорода, таким, какое подается в слой через нижние фурмы.

В процессе исследования изменяли коэффициент расхода дутья (n). Исследование выполнено для двух случаев – холодного и подогретого дутья. Данные по этому эксперименту представлены на рисунке 3.



(а) – подогретое дутье; (б) – холодное дутье

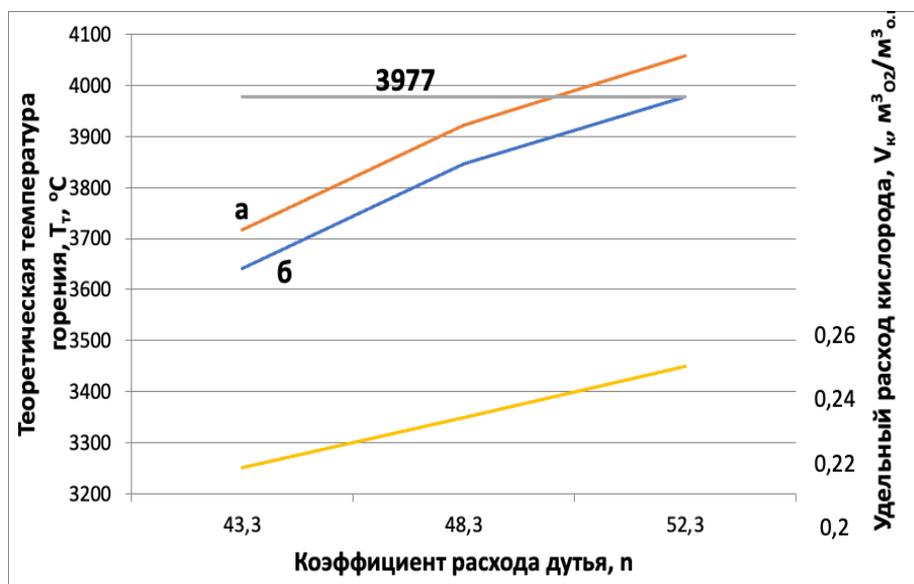
Рисунок 3 – Зависимость теоретической температуры горения от коэффициента расхода дутья с содержанием кислорода 60%

Из представленных результатов следует, что, используя в зоне дожигания вместо технического кислорода дутье, содержащее 60 % O_2 , в принципе можно обеспечить заданную температуру, как на подогретом дутье, так и на холодном. Однако, при этом удельный расход кислорода на сжигание 1 м^3 отходящих газов не сократится, а возрастет

по сравнению с вариантом применения для этих целей технического кислорода. Таким образом, заменять в зоне дожигания технический кислород дутьем, обогащенным кислородом с целью его экономии нельзя. Однако, это возможно осуществить, используя технический кислород, но уменьшая степень дожигания отходящих газов. Уменьшение коэффициента расхода дутья приведет к сокращению тепловыделения в зоне дожигания и падению температуры в этой зоне, что недопустимо. В определенной степени это можно компенсировать за счет подвода в слой теплоты путем подогрева дутья, подаваемого через нижние фурмы.

В четвертой серии экспериментов для базового режима определили допустимый предел уменьшения коэффициента расхода верхнего дутья при подаче в зону дожигания технического кислорода, подогретого до 400 °С, а на нижние фурмы – дутья, содержащего 60 % кислорода, в котором воздух подогрет до 600 °С, а кислород до 400 °С. Результаты расчета представлены на рисунке 4.

Это позволит без снижения температурного уровня в ванне уменьшить коэффициент расхода дутья в зоне дожигания до значения $n=0,48$ против 0,54 имеющего место в базовом режиме. При этом степень дожигания отходящих газов составит 46,1 %, а теоретическая температура в зоне дожигания – 3977 °С.



(а) – подогретое дутье; (б) – холодное дутье

Рисунок 4 – Зависимость теоретической температуры горения и удельного расхода кислорода от коэффициента расхода дутья при подаче в зону дожигания технического кислорода ($\beta_k=0,995$)

Таким образом, экономия кислорода в зоне дожигания на печи типа Ромелт с существующей системой теплогенерации наиболее целесообразна за счет понижения степени дожигания отходящих газов в надслоевом пространстве печи. Компенсировать снижение выделения теплоты, в зоне теплогенерации при этом возможно подогревая дутье, подаваемое в печь. Для базового режима при использовании серийных металлических теплообменников минимально допустимая степень дожигания составляет 46,1 %. При этом часовой расход технического кислорода сократится на 2357 м³, а удельный расход кислорода на 67,34 м³/т_{чуг}, что на 11,22 % ниже существующего.

Теплофизический анализ работы печи

Исходные данные

Анализ выполнен на основании теплового баланса базовой плавки (таблица 2).

Температура шихты и дутья на нижних и верхних фурмах принята равной 25 °С, температура ванны 1450 °С, температура уходящих из печи газов 1700 °С.

В таблице 3 представлены удельные показатели работы базового образца печи Ромелт в сравнении с прогнозными значениями этих величин.

Таблица 2 – Тепловой баланс базовой плавки (ГДж/ч)

Приход		Расход	
Шлаковая ванна			
Сгорание угля в ванне	93,91	Нагрев, плавление, восстановление компонентов шихты	222,96
		Испарение и разложение влаги	74,85
		Нагрев газов и угля в ванне	114,23
		Потери с охлаждающей водой в ванне	19,04
Зона дожигания			
Дожигание продуктов неполного сгорания над ванной	500,81	Нагрев газов над ванной	87,49
		Потери с охлаждающей водой в зоне дожигания	76,15
Итого	594,72	Итого	594,72

Таблица 3 – Удельные показатели тепловой работы печи жидкофазного восстановления в сравнении с литературными данными

№	Наименование показателя	Литературные данные	Данные с базового образца
1	2	3	4
1	Расход угля, т/т _{чуг}	0,9–1,1	0,731
2	Расход кислорода	1000–1200	812,59
3	Суммарная потеря теплоты с уходящими газами		3,63
В том числе			
	Потеря физической теплоты с уходящими из печи газами, ГДж/т _{чуг}		1,11
	Потеря химически связанной теплоты с уходящими газами		2,52
4	Суммарные потери теплоты на охлаждаемых элементах печи, ГДж/т _{чуг}		2,72
В том числе			
	Потери теплоты в зоне барботажного слоя, ГДж/т _{чуг}		0,54
	Потери теплоты в надслоевом пространстве, ГДж/т _{чуг}		2,18
	Суммарная потеря теплоты, ГДж/т _{чуг}		6,35

Как следует из данных таблицы 3 достигнутые на базовом образце результаты по расходу угля и кислорода почти на 20 % лучше, чем прогнозировавшиеся.

Обращает на себя внимание относительно невысокие потери теплоты с уходящими газами, приблизительно 22 %. При этом, основную часть потерь составляет химически связанная теплота – более 69 %. Малая доля физической связанной теплоты, теряемой с уходящими газами, объясняется их малым количеством, являющимся следствием применения в зоне дожигания технического кислорода вместо воздуха или дутья, обогащенного кислородом, как на нижних фурмах.

Высокий уровень химического недожога газов связан с их температурой в зоне дожигания. При таких температурах скорости реакций окисления CO и H₂ равны по порядку величин реакциям диссоциации продуктов горения.

Чрезвычайно высоки потери теплоты на охлаждаемых элементах печи – 16 % от общих затрат. При этом в зоне барботажного слоя эти потери составляют всего чуть больше 3 %, а в зоне дожигания – почти 13 %

Для разработки рекомендаций по сокращению удельного расхода топлива на производство тонны чугуна выполнили теплофизический анализ тепловой работы печи типа Ромелт по зонам.

Тепловая работа барботажного слоя

В ваннах печей с барботажным слоем при движении слоя со скоростью большей чем 1 мм/с перенос массы целевого компонента и теплоты осуществляется в основном конвективным механизмом. Интенсивность переноса характеризуется значениями эффективных коэффициентов теплопроводности и молекулярной диффузии, которые решающим образом зависят от гидродинамики барботажного слоя. При боковой продувке возможны три принципиально отличающихся друг от друга гидродинамических режима: пузырьковый, переходной и струйный.

Для определения режима истечения газа на печах типа Ромелт Г.С. Сборщиков предложил использовать безразмерный комплекс:

$$Gn = \frac{\rho_r \cdot w_r^2}{\rho_{ж} \cdot g \cdot h_{ж}} \quad (2)$$

где ρ_r – плотность газового потока, кг/м³;

w_r – скорость газа на выходе из фурмы, м/с;

$\rho_{ж}$ – плотность жидкой фазы, кг/м³;

$h_{ж}$ – высота слоя жидкости над продольной осью фурмы, м/с;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Этот комплекс по предложению автора был назван критерием М.А. Глинкова.

На базовом образце реализован переходной режим продувки, поэтому в активное перемешивание вовлечен только пристеночный слой ванны, гидродинамический режим барботажного слоя при этом напоминает периферийный ход доменной печи. Для вовлечения всего объема барботажного слоя в активный теплообмен необходимо перейти на струйный режим продувки. С переходом на струйный режим только за счет более чем двукратного увеличения межфазной поверхности теплообмена можно ожидать двукратное повышение удельной производительности печи. Этому будет способствовать также повышение качества и интенсивности перемешивания ванны.

Однако, как показали физико-химические исследования плавки, изменение гидродинамического режима продувки допустимо только в случае жесткого ограничения подачи кислорода в барботажный слой. Предназначение кислорода в слое – активизация горения той части угля, которая подается в качестве топлива. Сжигание угля в барботажном слое сопровождается большим недожогом, обусловленным горением частицы в ограниченном объеме пузыря, в котором повышается концентрация продуктов сгорания и соответственно, падает концентрация кислорода. Поэтому процесс горения неуправляем и экстенсивен. Следствием сказанного является то, что в объеме ванны генерируется только третья часть необходимой теплоты, а остальная часть передается на поверхность слоя из зоны дожигания за счет радиационно-конвективного теплообмена.

Таким образом, теплофизический анализ работы барботажного слоя показал следующее:

1. Потери теплоты через систему принудительного охлаждения этой зоны печи весьма ограничены.
2. Ванна обладает большими потенциальными возможностями в плане повышения удельной производительности печи по перерабатываемому сырью за счет вовлечения в процессы активного теплообмена застойных объемов слоя, что повлечет снижение удельного расхода топлива.
3. Следует признать неудовлетворительным существующий механизм генерации теплоты в объеме барботажного слоя.

Теплофизический анализ процессов, протекающих в надслоевом пространстве

В надслоевом пространстве располагается основная зона теплогенерации печи Ромелт, зона дожигания отходящих газов. Передача теплоты из зоны теплогенерации в зону технологического процесса – барботажный слой, происходит за счет радиационно-конвективного теплообмена.

Независимо от режима продувки и параметров барботажного слоя в надслоевом пространстве можно выделить две зоны. Первая зона – зона сепарации уноса. Вторая зона, располагающаяся выше, характеризуется практически отсутствием сепарации. Это – зона транспортируемого уноса.

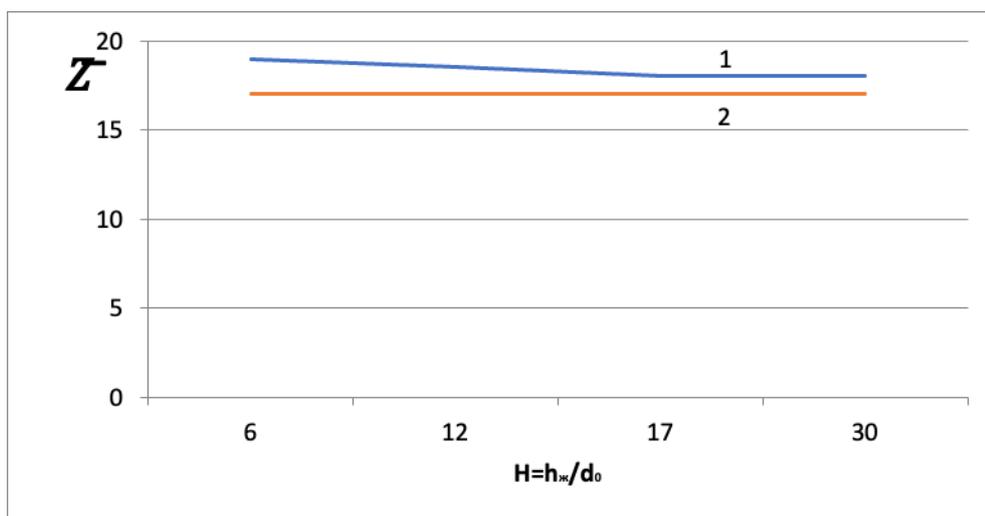
Было определено, что в базовом образце, зона дожигания совмещена с зоной сепарации, определили предельное количество теплоты, которое может быть передано из зоны дожигания барботажному слою конвекцией, т. е. за счет возвращаемого уноса.

Основу уноса составляют капли расплава, образующиеся на поверхности барботажного слоя при выходе из него отходящих газов.

Для базового режима продувки определили характерный размер капли возвращаемого уноса. Максимальный диаметр капель, образующихся на выходе из барботажного слоя равен $d_{к.макс} = 1168 \cdot 10^{-6}$, м. Максимальный диаметр капель, уносимых отходящими газами из печи $d_{к.внт} = 12,73 \cdot 10^{-6}$, м. Характерный диаметр возвращаемого в слой уноса равен $d_к = 122 \cdot 10^{-6}$, м.

Высоту зоны сепарации, $z_{кр}$, определили на основании теории гидродинамики газового потока с тяжелыми частицами. Для приближенного расчета приняли ряд допущений. Капли, вылетающие в надслоевое пространство, ведут себя как твердые сферические частицы, режим омыwania их потоком носит стоксовский, безотрывный характер. Поток в надслоевом пространстве слабо турбулизирован. Градиент вертикальной составляющей скорости в поперечном направлении невелик.

Результаты расчета относительной высоты зоны сепарации как функции высоты барботажного слоя для пузырькового и базового режимов продувки, представлены графически на рисунке 5.



1. Gn=0,61 – пузырьковый режим продувки;
2. Gn=2,26 – переходной режим продувки

Рисунок 5 – Зависимость высоты зоны сепарации надслоевого пространства от высоты слоя

Из графика следует, что увеличение глубины барботажного слоя при доструйных режимах продувки не приводит к изменению размеров образующихся капель, т. е. механизма их образования. Высота зоны сепарации для базового режима составляет 17,8

калибра выходного отверстия фурмы. Если диаметр фурмы $d_0=35$ мм, то зона сепарации будет иметь толщину $z_{з.с.}=0,623$ м над поверхностью барботажного слоя.

Время пребывания капли в зоне сепарации:

$$\tau = 5,159 \text{ сек}$$

Для базового режима удельное значение массы транспортируемого уноса $\omega_{\tau}=0,016$ кг/м³, а масса возвращаемого уноса равна

$$M=303\ 433 \text{ кг/час}$$

Основные теплофизические процессы, протекающие в зоне сепарации надслоевого пространства – теплообмен капли с окружающим газом и движение капли относительно потока.

Было определено характеристическое время межфазного теплообмена $t_0=1,065$ с., продолжительность начального периода нагрева капли в зоне сепарации $t_k^H = 0,001$ с., режим нагрева капли определили рассчитав для нее значение критерия Био $Bi_k = 0,002$. Т.к. $Bi_k \ll 0,3$ то по истечении 0,001 секунды после начала нагрева в капле реализуется режим нагрева термически тонкого тела. При этом температура во всех точках объема капли в любой момент времени будет одинаковой.

Количество теплоты, приносимое возвращаемым уносом в барботажный слой, за 1 час, при разных степенях дожигания представлено в таблице 4.

Базовому режиму работы соответствуют данные при $a_{дож}=58,8$ %. Из них следует, что в пределах зоны сепарации наиболее вероятная температура близка 2000 °С и в слой передается с возвращаемым уносом 266 ГДж/ч теплоты, т.е. примерно половина всей теплоты, поступающей из зоны дожигания.

Таблица 4 – Расчеты конвективного переноса теплоты из надслоевого пространства в барботажный слой при дожигании отходящих газов в зоне сепарации

Степень дожигания, $a_{дож}$, %	43,3	52,5	58,8	68,9	89,6
Теоретическая температура горения в зоне сепарации, T_T , °С	3462	3597	3707	3997	4412
Действительная температура в зоне сепарации, T_0 , °С	1499	1888	2180	2754	3953
Температура возвращаемого в ванну уноса, °С	1497,5	1874,64	2157,74	2714,23	3876,66
Количество теплоты, приносимое уносом, Q , ГДж/ч	16,9	155,9	266,02	497,1	1041,96

Вторым механизмом теплообмена между зоной дожигания и барботажным слоем является радиационный теплообмен.

Особенность радиационного теплообмена между зоной дожигания и барботажным слоем заключается в следующем. В зоне дожигания существует две области с разной концентрацией дисперсных частиц: зона сепарации, концентрация дисперсных частиц в объеме которой составляет 36 %, и зона транспортируемого уноса, концентрация дисперсных частиц в которой составляет не более 2 %.

В связи с этим механизмы радиационного теплообмена между поверхностью барботажного слоя и зонами сепарации и уноса будут различными. Зона сепарации излучает тепловую энергию на поверхность барботажного слоя как абсолютно черное тело, то есть степень черноты этой зоны равна единице. Для процесса излучения зоны транспортируемого уноса на поверхность барботажного слоя, зона сепарации является экраном, причем, в связи с тем, что это абсолютно черное тело на поверхность барботажного слоя будет попадать только собственное излучение зоны сепарации, так как вся лучистая энергия, передаваемая из зоны транспортируемого уноса, будет поглощаться в зоне сепарации.

В связи с изложенным вклад лучистой составляющей в тепловой баланс процесса жидкофазного восстановления определили, изучая радиационный теплообмен между зоной сепарации и барботажным слоем при работе печи в базовом режиме и локализации дожигания отходящих газов в зоне сепарации ($a_{\text{дож}}=58,8\%$). Так как дожигание происходит по всему объему зоны сепарации, то принимаем, что предельно возможная температура будет одинаковая во всех точках этой зоны. Далее приняли поверхность барботажного слоя и поверхность зоны сепарации как две плоские параллельные поверхности.

Тепловой поток излучения равен $Q_{\text{б.с.}}^{\text{л}} = 230,255 \frac{\text{ГДж}}{\text{ч}}$.

Суммарная величина расчетного теплового потока, поступающего в барботажный слой из зоны дожигания за час при работе в базовом режиме, составляет 496,275 ГДж, что практически совпадает с балансовыми данными базовой плавки. Если учесть, что в расчете принимались оптимальные условия дожигания отходящих газов в надслоевом пространстве, то полученный результат свидетельствует об отсутствии возможности сократить удельный расход топлива за счет оптимизации процесса дожигания. Сократить удельный расход топлива на базовом агрегате при неизменной температуре в надслоевом пространстве возможно за счет уменьшения потерь теплоты в системе принудительного охлаждения ограждений верхнего строения печи.

Для существенного сокращения потерь теплоты в системе принудительного охлаждения надслоевого пространства печи необходимо изменить конструкцию верхних кессонов на ошипованные с огнеупорной набивкой.

Практика применения плавильных циклонов показывает, что это мероприятие позволяет довести суммарные потери теплоты с охлаждающим агентом в системе принудительного охлаждения до 5–7 % от общего расхода. К сожалению, нехватка исходных данных не позволила оценить для базового варианта экономию топлива, которую можно получить при реализации указанного мероприятия.

Таким образом, теплофизический анализ процессов, протекающих в надслоевом пространстве печи, позволяет сделать следующие выводы:

1. Теплота из надслоевого пространства в барботажный слой передается в равных долях конвекцией и излучением.

2. При фиксированных температуре в надслоевом пространстве и режиме продувки ванны невозможно увеличить тепловой поток из зоны дожигания в барботажный слой. Предельно достижимая величина указанного потока соответствует значению, полученному на базовом образце и достигнута в результате локализации зоны дожигания отходящих газов в зоне сепарации уноса.

3. Большие потери теплоты в системе принудительного охлаждения верхнего строения печи можно сократить за счет нанесения на их поверхность огнеупорной теплоизоляции. Это позволит примерно втрое сократить потери теплоты в системе принудительного охлаждения верхнего строения печи.

Теплотехнический анализ процесса утилизации теплоты отходящих газов

Согласно тепловому балансу базового варианта с уходящими газами, покидающими рабочее пространство печи, уносится 201,72 ГДж/ч теплоты, т. е. примерно 34 % от теплового баланса. 69 % от этого количества составляет химически связанная теплота. Дожигание горючих компонентов и утилизация теплоты уходящих газов происходит в котле-утилизаторе, расположенном на газоходе за печью. При этом вырабатывается до 250 т/ч пара энергетических параметров ($P=3,9$ МПа, $T=440$ °С). Такая схема не является оптимальной с точки зрения задач, поставленных в настоящей работе. Наиболее целесообразной в данном случае является рекуперативная схема использования теплоты уходящих газов, при реализации которой отнимаемая у газов теплота возвращается в рабочее пространство печи. Рекуперация теплоты может осуществляться за счет подогрева воздуха и кислорода, поступающих в печь. Также возможно организовать предварительный нагрев шихты, поступающей на плавку. Для этого

необходимо уголь, подаваемый вместе с железосодержащими материалами и флюсами, доставлять в загрузочную течку отдельно. В таком случае появится возможность подогреть шихту за счет теплоты уходящих газов до 600 °С во вращающейся трубчатой печи. В целом, за счет применения рекуперативного метода утилизации в рабочее пространство печи можно вернуть до 48 % от суммарной теплоты уходящих газов. Экономия топлива составит при этом 14 % часового расхода.

Оставшуюся часть теплоты уходящих газов можно использовать для выработки пара. Необходимо, однако, учесть, что котел-утилизатор за печью является вспомогательным оборудованием и для него будет характерен неустойчивый режим работы. В связи с этим не следует планировать установку жесткой схемы печь-котел-турбина-генератор. Вырабатываемый на печи водяной пар целесообразно продавать потребителю (например на ТЭЦ) в качестве продукта с ненормируемыми параметрами.

Обсуждение результатов исследования работы печи жидкофазного восстановления

Проведенные исследования работы печи жидкофазного восстановления свидетельствуют о безусловной перспективности агрегатов. Техничко-экономические показатели, достигнутые на опытно-промышленной печи, существенно превосходят прогнозы, имеющиеся в современной литературе. Принцип высокотемпературной переработки сырья в расплаве с регулируемым химическим составом не требующий предварительной подготовки сырья и топлива, заложенный в основу процесса жидкофазного восстановления делает его привлекательным для многих отраслей промышленности.

Задача, поставленная в настоящей работе, предлагала найти возможность понизить удельный расход кислорода и топлива на печи жидкофазного восстановления. Для решения поставленной задачи выполнены физико-химический и теплофизический анализ работы и конструкции базового образца. В связи с тем, что в работе использовались численные значения конкретных величин, характерные для базового образца, полученные численные значения изучаемых показателей применимы именно к этому варианту. Однако, выводы, сделанные по результатам этих анализов, носят объективный характер.

Для базового варианта процесса жидкофазного восстановления возможно улучшить удельные показатели, расход кислорода и расход угля, за счет следующих мероприятий:

1. Расход кислорода можно сократить за счет регулирования степени дожигания отходящих газов в надслоевом пространстве печи. Предельная экономия составит 7,4%.

Реализация этой рекомендации потребует применения подогрева воздуха и кислорода, подаваемых на печь, в отдельных подогревателях.

2. Для сокращения расхода угля необходимо организовать подогрев воздуха, кислорода и шихты за счет физической и химической теплоты уходящих газов. Для этого на трассе газохода установить трубчатую вращающуюся печь и перенести в нее дожигание уходящих газов.

При подогреве шихты до 600 °С, воздуха до 500 °С, а кислорода до 400 °С экономия угля составит 14 % от общего часового расхода. Кроме того, сократить расход топлива можно применив в надслоевом пространстве печи кессоны с огнеупорной набивкой.

3. Предполагаемые изменения обеспечат повышение технико-экономических показателей действующей схемы процесса жидкофазного восстановления, однако не создадут принципиальных условий для его дальнейшего развития. Это развитие должно происходить в направлении полного исключения применения технического кислорода, включения всего объема барботажного слоя в тепломассообменные процессы, протекающие с предельно возможной интенсивностью, понижения температуры в надслоевом пространстве печи, предельного повышения степени использования теплоты расходуемого топлива непосредственно в процессе. Для реализации перечисленных требований необходимо изменить схему теплогенерации в печи. Необходимо отказаться от сжигания топлива в барботажном слое и его дожигания в надслоевом пространстве печи. Это позволит управлять процессом горения и снизить температуру в надслоевом пространстве печи.

4. Необходимо также перевести гидродинамику барботажного слоя в режим идеального смешения, для чего перейти на струйный режим продувки ванны. Наконец потребуются коренным образом изменить систему утилизации химической и физической теплоты уходящих из печи газов.

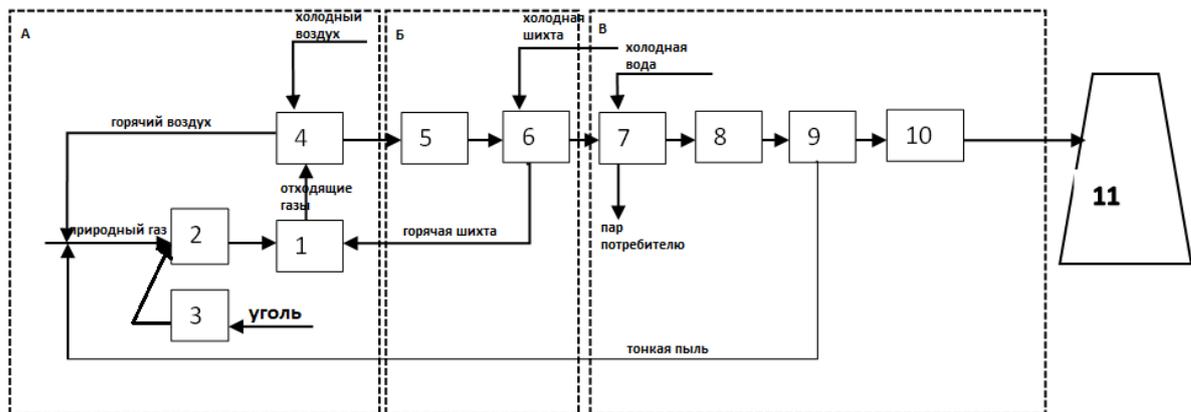
5. Для сокращения потерь теплоты и энергии в системе принудительного охлаждения печи необходимо перевести ее целиком на испарительное охлаждение. Это позволит на порядок сократить расход химочищенной воды и повысит надежность работы системы, а также сократить насосный парк, обслуживающий ее.

В третьей главе представлена разработка принципиальной схемы реконструкции процесса и печи Ромелт (рисунок 6).

В отличии от базовой установки предлагаемая установка включает дополнительно обслуживающие системы:

- сжигание топлива;
- подогрева воздуха, идущего на сжигание топлива и дожигание отходящих газов;
- подогрева шихты;
- измельчения угля, используемого в качестве генератора восстановителя;
- транспортировки пылеугля и пылей тонкой очистки газов к дутьевым соплам.

На предлагаемой установке в барботажный слой вдувается не дутье, обогащенное кислородом, а продукты сгорания природного газа заданного состава и с заданной температурой. С этой целью на печи вместо нижних фурм установлены модернизированные топки. В качестве воздухоподогревателя используется трубчатый радиационный теплообменник с огнеупорной набивкой, вмонтированный в ограждения надслоевого пространства печи. Подогрев шихты осуществляется во вращающейся трубчатой печи за счет теплоты отходящих газов, температура которых после воздухоподогревателя повышается в узле дожигания, являющемся камерой сгорания трубчатой печи.



А – барботажный агрегат; Б – подогрев шихты; В – блок газоочистки; 1 – ванна расплава, 2 – топка; 3 – узел подготовки пылеугля; 4 – воздухоподогреватель; 5 – устройство для дожигания отходящих газов; 6 – вращающаяся печь; 7 – котел утилизатор; 8 – головной дымосос; 9 –рукавный фильтр; 10 – хвостовой дымосос; 11 – дымовая труба

Рисунок 6 – Новая схема теплогенерации тепла в печи Ромелт

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Среди разрабатываемых и осваиваемых в промышленности процессов внедоменного получения железа наиболее перспективным является процесс жидкофазного восстановления. Он позволяет полностью исключить из действующей трехстадийной схемы производства стали первую стадию – подготовку сырья и угля к доменной плавке.

К настоящему времени единственной печью жидкофазного восстановления, прошедшей опытно-промышленные испытания, является печь Ромелт.

Это универсальный плавильный агрегат, способный перерабатывать практически любое сырье и осуществлять как восстановительные так и окислительные технологические процессы в своем рабочем пространстве. В настоящей работе исследована возможность улучшить технико-экономические показатели печи жидкофазного восстановления.

Установлено, что основной причиной, тормозящей дальнейшее развитие процессов и печей жидкофазного восстановления железа является механизм генерации теплоты, предусматривающий частичное сжигание топлива в расплаве и дожигание продуктов неполного горения в надслоевом пространстве с возвратом части выделяющейся теплоты в слой с помощью конвективно–радиационного теплообмена. С одной стороны, он обуславливает необходимость подачи технического кислорода в надслоевое пространство для поддержания в нем сверхвысокой температуры, а с другой – использование технического кислорода в барботажном слое для интенсификации погружного горения топлива в нем. Передача теплоты из надслоевого пространства на поверхность барботажного слоя создает неравномерное температурное поле в нем. Поверхность слоя перегрета по сравнению с фурменной зоной примерно на 200 °С. Это отрицательно сказывается на производительности печи.

Установлено также неполное использование объема барботажного слоя в процессе плавки. Только половина объема участвует в процессах теплообмена. Причиной этого является некачественное перемешивание расплава в барботажном слое.

Для исключения указанных сдерживающих факторов предлагается вынести процесс сжигания топлива за пределы рабочего пространства печи и сделать его одностадийным и управляемым, что позволит исключить подачу кислорода. Необходимо также перейти от переходного к струйному режиму продувки, что позволит вовлечь в процессы теплообмена весь объем барботажного слоя. В работе представлен один из возможных вариантов реализации указанных предложений.

В таблице 5 представлены удельные показатели модифицированного процесса жидкофазного восстановления в сравнении с данными по базовому образцу.

Таблица 5 – Удельные показатели модифицированной печи жидкофазного восстановления в сравнении с данными печи Ромелт

№	Наименование показателя	Размерность	Значение	
			Базовый	Модифицированный
1	2	3	4	5
1	Расход сырья	т/Т _{чуг}	2,141	2,141
2	Расход угля	т/Т _{чуг}	0,731	0,47
3	Расход природного газа	нм ³ /Т _{чуг}	-	257,51
4	Расход кислорода	нм ³ /Т _{чуг}	812,59	-
5	Объём отходящих газов	нм ³ /Т _{чуг}	2040	3790
6	Расход теплоты	ГДж/Т _{чуг}	18,18	12,06
7	Потери теплоты с отходящими газами	ГДж/Т _{чуг}	3,63	4,79
8	Рекуперация теплоты отходящих газов	%	-	70
9	Потери теплоты в системе охлаждения	ГДж/Т _{чуг}	2,82	0,723
10	Удельный расход условного топлива	кг _{ул} /Т _{чуг}	592,78	311,87

В предлагаемом варианте сжигание топлива (любого) осуществляется в выносных топках, прикрепленных к каждой фурме нижнего ряда. Это позволит сжигать топливо с заданным коэффициентом расхода воздуха и получать продукты сгорания заданного состава и с необходимой температурой на входе в слой.

Генератором восстановителя является уголь, загружаемый в печь в пылевидном состоянии через нижний ряд фурм с продуктами сгорания природного газа, используемого как топливо. В качестве окислителя топлива используется воздух.

В принципе восстановитель в газообразном виде, оксид углерода и водород, можно получить, реализуя процесс неполного сжигания газа и тем самым еще больше сократить или, в пределе, полностью исключить применение угля в процессе. Однако, имеются

экспериментальные данные о том, что достаточно глубокое восстановление оксидов металлов и получение чугуна невозможно без наличия твердого углерода.

Вопрос возможности применения только газообразного восстановителя или соотношения между твердым и газообразным восстановителями для процесса жидкофазного восстановления требует отдельного исследования.

Таким образом, задача, поставленная перед настоящим исследованием решена полностью. Сформулированы предложения, позволяющие значительно улучшить показатели работы перспективного агрегата жидкофазного восстановления железа. Разработано предложение по принципиальному изменению теплотехники печи жидкофазного восстановления, позволяющее отказаться от применения кислорода в рабочем пространстве печи и существенно сокращающее удельный расход топлива.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

1. Design of Tubular Caisson with Refractory Packing Placed in Water–Cooled Tenons for Use in Silicate Melts, Sborshchikov G.S., Terekhova A.Y., “Refractories and Industrial Ceramics” 57(6), 2017 г., стр. 574–577.
2. Structure of the Tuyere Zone of A Tank Furnace with A Bubbling Layer and Gas Delivery Through A Tuyere Located on the Side Wall Below the Level of the Molten Glass, Sborshchikov G.S., Terekhova A. Yu. “Glass and Ceramics” (English translation of Steklo i Keramika), 2017 г., стр. 1–4.
3. Selection of the Optimal Air Heating Temperature for Glassmaking Tank Furnaces, Terekhova A.Y. Sborshchikov G.S., “Glass and Ceramics” (English translation of Steklo i Keramika) 74(1–2), 2017 г., стр. 18–19.
4. Структура фурменной зоны ванной печи с барботажным слоем при подаче газа через фурму, расположенную на боковой стенке под уровнем стекломассы, Сборщиков Г.С., Терехова А.Ю. «Стекло и керамика» №12, 2016 г., стр. 3–7.
5. Расчет конструкции трубчатого кессона с огнеупорной набивкой по шипам с водяным охлаждением, предназначенного для работы в силикатном расплаве, Сборщиков Г.С., Терехова А.Ю. «Новые огнеупоры» №11, 2016 г., стр. 21–23.
6. Увеличение удельной производительности печи Ромелт, Сборщиков Г.С., Петелин А.Л., Терехова А.Ю. «Металлург» №3, 2020 г., стр. 37–41.
7. Исследование тепловой работы надслоевого пространства печи Ромелт. Сборщиков Г.С., Петелин А.Л., Терехова А.Ю. «Известия высших учебных заведений. Черная металлургия» 65(4), 2022 г., стр. 240-245.

Список свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ:

1. № 2016616873 «Программа для расчета низшей теплоты сгорания» Шатохин К.С., Терехова А.Ю. 21.06.2016.
2. №2016663532 «Перемешивание ванны печи с барботажным слоем в результате свободной конвекции» Сборщиков Г.С., Крупенников С.А., Володин А.М., Терехова А.Ю., 12.12.2016.