

На правах рукописи

КОЛЕСНИКОВ ЮРИЙ СЕРГЕЕВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ШЛАКОУГОЛЬНЫХ
СУСПЕНЗИЙ И ОСОБЕННОСТЕЙ ВОССТАНОВЛЕНИЯ В НИХ
ЖЕЛЕЗА С ЦЕЛЬЮ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ
ПРОЦЕССА РОМЕЛТ**

Специальность 05.16.02 - «Металлургия черных, цветных и редких металлов»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2006

Работа выполнена
в лаборатории «Плавки железорудного сырья»
Московского государственного института стали и сплавов
(технологического университета)

Научный руководитель:
доктор технических наук Усачев А.Б.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор Лисиенко В.Г.
кандидат технических наук, доцент Федоров А.Н.

Ведущая организация:
ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», г. Москва

Защита состоится 28 декабря 2006 г. в 10⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д.212.132.02 при Московском государственном институте стали и сплавов (технологическом университете) по адресу: 119049, г. Москва, В-49, ГСП-1, Ленинский проспект, д.6, ауд. А-305.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного института стали и сплавов (технологического университета).

Автореферат разослан 27 ноября 2006 г.

Справки по телефонам: (495) 230-45-27, 234-07-52 (факс)

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор

Семин А. Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы определяется нарастающей потребностью промышленности в технологии бескоксового производства чугуна из руд и железосодержащих отходов.

Единственным российским процессом бескоксового производства чугуна, успешно испытанным в промышленном масштабе, является процесс Ромелт. Эта технология разработана в Московском институте стали и сплавов (МИСиС). В настоящее время В/О “Тяжпромэкспорт” в сотрудничестве с рядом научных и проектных организаций осуществляет комплекс работ по сооружению первого в мире завода по производству чугуна процессом Ромелт в Союзе Мьянма. Намечается строительство таких заводов в России.

Основной реакционной зоной печи Ромелт является шлаковая ванна, продуваемая через систему боковых фурм кислородсодержащим дутьем. Частицы угля непрерывно подаются на поверхность шлаковой ванны и замешиваются в объем шлака. Наибольшее содержание угля отмечается в поверхностном слое ванны, в нижних горизонтах оно резко снижается. Частицы угля участвуют как в процессах восстановления железа из шлака, так и в процессах горения и газификации в зонах барботажных столбов. В зависимости от количества накопленного в ванне угля, его фракционного состава, а также от параметров продувки, геометрии ванны и физических свойств шлака характер распределения частиц угля в ванне может сильно изменяться. Это влияет на эффективность горения угля в барботажных столбах и восстановление железа углем. Кроме того, эффективное замешивание угля обеспечивает стабильную работу печи при высоких насыщениях шлакоугольной суспензии без наступления технологически неприемлемого режима блокировки слоем угля поверхности ванны, сопровождающегося резким ухудшением теплопередачи в ванну из зоны дожигания. Решение данной проблемы позволит вести восстановительную плавку при больших концентрациях угля, что обеспечит повышение производительности печи.

Дальнейшее совершенствование процесса Ромелт и расширение области его применения невозможно без изучения влияния на структуру шлакоугольной суспензии гидродинамического режима ванны, исследования механизма и кинетики восстановления железа в пневматически перемешиваемых шлакоугольных суспензиях.

Целью настоящего исследования являлось совершенствование технологии процесса жидкофазного восстановления железа Ромелт на основе физического моделирования гидродинамики и изучения особенностей восстановления железа в шлакоугольных суспензиях.

Для достижения поставленной цели в работе поставлены и решены следующие задачи:

- разработать методику и создать экспериментальную установку для холодного физического моделирования гидродинамики шлакоугольной суспензии процесса Ромелт;
- изучить на физической модели закономерности замешивания угольных частиц в объем ванны при варьировании параметров продувки, высоты ванны, физических свойств жидкости, фракционного состава модельных частиц и их общего содержания в ванне;

- изучить на физической модели закономерности наступления режима блокировки поверхности ванны сплошным слоем из угольных частиц;
- экспериментально изучить эффективность основных схем жидкофазного восстановления железа;
- разработать методику формально-кинетического анализа восстановления железа в шлакоугольной суспензии;
- исследовать зависимость кажущейся константы скорости восстановления железа в шлакоугольной суспензии от размеров частиц восстановителя, температуры и интенсивности перемешивания расплава;
- разработать рекомендации по совершенствованию технологии процесса Ромелт.

Автором выносятся на защиту:

- методика холодного физического моделирования гидродинамики шлакоугольной суспензии процесса Ромелт;
- результаты физического моделирования шлакоугольной суспензии процесса Ромелт;
- результаты экспериментального сопоставления эффективности восстановления железа при прямом контакте шлака с графитом и через газовую фазу;
- методика формально-кинетического анализа жидкофазного восстановления железа в шлакоугольных суспензиях и результаты экспериментального исследования
- рекомендации по совершенствованию технологии процесса Ромелт.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- на основе совершенствования гидродинамического режима шлакоугольной суспензии разработаны рекомендации по повышению производительности процесса Ромелт;
- разработана методика обеспечения динамического подобия при холодном физическом моделировании струйной боковой продувки шлаковой ванны печи Ромелт;
- определены условия подобия для частиц угольной взвеси в турбулентном шлаковом расплаве;
- определены условия подобия для крупных частиц угля при большой неоднородности их распределения по высоте турбулентной жидкой ванны;
- разработаны физическая модель и методика экспериментального исследования структуры барботируемой суспензии;
- установлена зависимость эффективности замешивания частиц в объем ванны и в барботажные столбы от изменения расхода дутья, диаметра фурм, высоты ванны над фурмами, общего количества частиц в ванне, их фракционного состава и вязкости жидкости;
- установлены закономерности наступления режима блокировки поверхности ванны сплошным слоем из угольных частиц;
- экспериментально подтверждена определяющая роль в восстановлении железа в шлакоугольных суспензиях схемы прямого восстановления в одну стадию;
- разработана методика формально-кинетической оценки скорости жидкофазного восстановления железа в шлакоугольных суспензиях;

- установлена зависимость константы скорости восстановления железа в шлакоугольных суспензиях от изменения фракционного состава восстановителя, температуры и интенсивности перемешивания расплава.

Практическая значимость. Разработанные на основе результатов проведенных исследований практические рекомендации по повышению производительности процесса Ромелт, по рациональным фракционному составу угля, содержанию угля в шлаковой ванне и вязкости шлака, используются при проектировании печей Ромелт и составлении технологических инструкций по ведению процесса на установках Ромелт.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на VI Международной научно-практической конференции «Проблемы энергосбережения и экологии в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах», 2005 г. Пенза; на Международной научно-практической конференции «Прогрессивные технологии развития», 2005 г. Тамбов; на Второй Всероссийской конференции молодых специалистов «Металлургия XXI века», 2006 г. Москва; на III Международной научно-практической конференции «Металлургическая теплотехника: история, современное состояние, будущее. К столетию со дня рождения М. А. Глинкова» 2006 г., Москва, на 2-й Международной Научно-практической конференции «Составляющие научно-технического прогресса», 2006 г., Тамбов.

Публикации. По результатам работы опубликовано 2 статьи и 5 докладов в сборниках трудов научных конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из общей характеристики, списка условных обозначений, введения, шести глав, заключения и изложена на 167 стр. Диссертация содержит 44 рис. и 1 таблицу. Список литературных источников включает 103 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована необходимость совершенствования процесса Ромелт на основе изучения влияния гидродинамического режима на структуру шлакоугольной суспензии, исследования особенностей механизма и кинетики восстановления железа в шлакоугольных суспензиях.

Глава 1. Состояние вопроса и постановка задачи исследования.

На основе изучения и обработки имеющихся литературных данных провели подробный анализ связи гидродинамического режима плавки с основными параметрами наиболее технологически продвинутых процессов бескоксовой металлургии чугуна Ромелт, Hismelt, AusIron, DIOS и Redsmelt-NST. Показано, что структура шлакоугольной суспензии чрезвычайно неоднородна, ее пространственные изменения и насыщенность определяющим образом влияют на эффективность процессов жидкофазного восстановления, теплопередачу из зоны дожига к шлаковой ванне, вспенивание шлака, науглероживание металла. Таким образом, характер распределения дисперсного угля в объеме ванны играет определяющую роль в успешной реализации всех этих процессов.

На опытно-промышленной установке Ромелт в период освоения технологии были получены отдельные данные о структуре шлакоугольной суспензии. Для

системного изучения влияния различных параметров гидродинамического режима процесса на структуру и свойства шлакоугольной суспензии необходимы широкие модельные исследования.

В процессе Ромелт распределение частиц угля в ванне определяется характером циркуляции шлака. Поэтому при физическом моделировании гидродинамики шлакоугольной суспензии необходимо использовать методику, позволяющую обеспечить геометрическое подобие в распространении струй бокового дутья в жидкости, а также подобие в количестве жидкости, «прокачиваемой» в единицу времени через эти струи. Эти два требования взаимосвязаны, невыполнение одного из них нарушает динамическое подобие. Также необходимо обеспечить подобие в характере увлечения частиц угля шлаком.

На основе анализа литературных данных, как наиболее подходящие к задачам исследования, были выбраны и подробно проанализированы две методики физического моделирования струйной продувки.

Показано, что применение методики физического моделирования боковой струйной продувки Г. С. Сборщикова может обеспечить только подобие фурменных зон ванны печи Ромелт и ее модели, поскольку не учитывает эффект термического расширения дутья, принципиально влияющий на интенсивность движения жидкости в барботажных столбах (вне фурменных зон струй). Методика Д. Мазумдара, разработанная для моделирования донной струйной продувки, учитывает эффект термического расширения газа, но оставляет открытым вопрос о величине диаметра фурмы на модели. Показано, что обе методики после их совместной адаптации могут быть использованы при физическом моделировании ванны процесса Ромелт.

Помимо подобия в циркуляции в ванне, необходимо обеспечить подобие в характере увлечения частиц угля шлаком. Проведенный анализ литературных источников показал, что при физическом моделировании частиц шлакоугольной суспензии процесса Ромелт практически невозможно использовать результаты по исследованию гидродинамики суспензий, полученные для других технологических процессов. Показано, что необходима разработка двух отдельных методик моделирования угольных частиц: для мелких, взвешенных в несущей турбулентной жидкости, и для крупных частиц, неравномерно распределенных в объеме ванны.

Угольные частицы, образующие в перемешиваемом струями кислородовоздушного дутья шлаке суспензию, вносят основной вклад в интегральную скорость восстановления железа в процессе Ромелт. Поскольку из шлаковой ванны выделяются преимущественно CO и H_2 , можно сделать вывод о реализации в процессе Ромелт реакции прямого восстановления железа. Однако, как известно, этот процесс может протекать в одну или в две стадии. Скорость реакции при одностадийной схеме восстановления зависит от величины суммарной поверхности угольных частиц, а в двухстадийной - от величины суммарной поверхности пузырей, содержащих угольные частицы. Анализ литературных данных показал, что константы скорости восстановления по указанным межфазным границам существенно различны. Поэтому определение преобладающей схемы восстановления важно для выяснения кинетических возможностей процесса.

Поскольку в интенсивно перемешиваемом шлаке степень блокировки поверхности угольных частиц разных размеров газовыми пузырями различна, можно ожидать, что в процессе Ромелт соотношение вкладов в интегральную скорость получения железа основных схем восстановления – в одну и в две стадии может

быть для частиц угля разных размеров также различным. Работ, посвященных изучению влияния на кинетику восстановления в пневматически перемешиваемом шлаке блокировки пузырями поверхности углеродистых частиц различных фракций, в литературе не обнаружено.

Исходя из проведенного анализа, был сделан вывод о целесообразности разработки методик и проведения физического моделирования гидродинамики шлакоугольных суспензий процесса Ромелт, выявления основной схемы и особенностей кинетики жидкофазного восстановления железа с участием дисперсного твердого углерода.

Глава 2. Вывод совокупности критериев подобия для физического моделирования шлакоугольных суспензий процесса Ромелт.

Задача физического моделирования в данном случае состоит в воспроизведении на модели подобных оригиналу полей скоростей жидкости и содержащий твердой дисперсной примеси, в изучении их изменений при варьировании основных параметров гидродинамического режима. Полученная совокупность критериев подобия при моделировании боковой струйной продувки шлакоугольных суспензий процесса Ромелт имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} Fr_m^* = \frac{U_{см.}^2}{gh}; \quad Re = \frac{\rho_{жс} U_{см.} h}{\mu}; \quad Gn = \frac{\rho_2 U_2^2}{\rho_{жс} gh}; \quad H = \frac{h}{X_0}; \quad \frac{X_i}{X_0}; \quad \frac{\rho_c}{\rho_{жс}}; \\ Ar_c = \frac{|\rho_c - \rho_{жс}| * \rho_{жс} g d_c^3}{\mu^2}; \quad Re_c = \begin{cases} \left[\frac{\rho_c - \rho_{жс}}{\rho_{жс}} \right] * \left[\frac{d_c}{\lambda_0} \right]^3, & \text{при } d_c \ll \lambda_0 \\ \frac{\rho_{жс} - \rho_c}{\rho_c^{\frac{1}{6}} \rho_{жс}^{\frac{1}{3}}} * \left[\frac{d_c}{\lambda_0} \right]^4, & \text{при } d_c \gg \lambda_0 \end{cases}; \quad L_c \sim d_c \left[\frac{1-\beta}{V_6 \beta} \right]^{\frac{1}{3}} \end{array} \right\}$$

где $U_{см.} = 3,1 \frac{Q^{0,33} h^{0,25}}{r^{0,58}}$ - средняя скорость подъема газожидкостной смеси в барботажном столбе, м/с; $\lambda_0 = \left[\frac{\mu^3}{\varepsilon \rho_{жс}^2} \right]^{\frac{1}{4}}$ - внутренний масштаб турбулентности в системе (м);

Q - расход газа в струе (с учетом термического расширения газа), м³/с; ε - удельная мощность перемешивания, Вт/м³; r - половина межфурменного расстояния, м; h - высота ванны над уровнем фурм, м; g - ускорение свободного падения, м/с²; ρ_2 - плотность газа, кг/м³; U_2 - скорость газа в выходном сечении фурмы, м/с; $\rho_{жс}$ - плотность жидкости, кг/м³; μ - динамическая вязкость жидкости, Па*с; V_6 - объем жидкости, м³; d_c - диаметр частиц, м; β - объемное содержание частиц, доли ед.; X_i - линейные размеры печи (кроме диаметра фурм и характерного диаметра частиц), м; X_0 - базовый размер, м;

Fr_m^* - модифицированный критерий Фруда; Re - критерий Рейнольдса (Fr_m^* и Re обеспечивают подобие в циркуляции жидкости); Gn - критерий Глинкова (обеспечивает подобие зон продувки); Re_c - критерий Рейнольдса для турбулентного потока, обтекающего частицу (обеспечивает подобие во взаимодействии частиц с турбулентными пульсациями потока, зависит от соотношения размера частицы и внутреннего масштаба турбулентности); Ar_c - критерий Архимеда (обеспечивает подобие в замешивании частиц в объем ванны); L_c - критерий подобия содержания частиц в суспензии; $\frac{X_i}{X_0}$ - симплекс подобия конструктивных элементов; H - симплекс подобия высоты

ванны; $\frac{\rho_c}{\rho_{жс}}$ - симплекс подобия плотностей частиц и жидкости.

Для обеспечения подобия в циркуляции расплава адаптировали указанные выше методики физического моделирования Мазумдара и Сборщикова.

В методике Мазумдара определяющий критерий динамического подобия - модифицированный критерий Фруда $Fr_m^* = \frac{U_{см.}^2}{gh}$ был получен из анализа основных сил, действующих в струе выше фурменной зоны. Входящая в этот критерий, средняя скорость подъема газожидкостной смеси в барботажном столбе $U_{см.} = 3,1 \frac{Q^{0,33} H^{0,25}}{R^{0,58}}$ рассчитывается по известной модели турбулентной газожидкостной струи Шахаи-Гутри, хорошо согласующейся с экспериментальными данными. Числовой коэффициент в выражении для $U_{см.}$ включает в себя ускорение свободного падения и некоторые другие константы и является размерным.

При выводе критерия Fr_m^* , Мазумдаром были сделаны допущения, учитывающие специфику условий донной продувки в агрегатах ковшевой металлургии. Поскольку для таких систем характерны невысокие величины газосодержаний вне фурменной зоны струи (2-10%), им было принято, что на модели и в образце значения газосодержаний в струе всегда примерно равны и что высота слоя при таких условиях продувки практически равна высоте спокойной ванны.

Поскольку такие допущения неприемлемы при моделировании интенсивной продувки в процессе Ромелт, провели полный вывод критерия Fr_m^* без упрощающих допущений. Было показано, что конечное выражение для данного критерия при этом не изменяется, в него входят только величины, заданные в условиях однозначности.

Было также показано, что методика Мазумдара, разработанная для моделирования донной продувки расплавов, применима и для моделирования боковой термически расширенной струи на участке ее практически вертикального распространения выше фурменной зоны (барботажный столб). Эта методика позволяет рассчитать необходимый для подобия в интенсивности циркуляции жидкости расход дутья на модели, но оставляет открытым вопрос о диаметре фурм на модели ($d_0^{mod.}$).

При боковой струйной продувке скорость ввода дутья (а, следовательно, и $d_0^{mod.}$) определяет характер распространения (траекторию) струи. Поэтому при моделировании принципиально важно обеспечить подобие параметров фурменных зон образца и модели.

В методике Сборщикова это достигается выполнением требования равенства значений критерия Глинкова $Gn = \frac{\rho_2 U_2^2}{\rho_{жс} gh}$ на модели и в образце. Из этого условия в данной методике рассчитывается расход дутья на модели. При этом соблюдается единый масштаб геометрического подобия для диаметров фурм и остальных линейных размеров.

Было обосновано, что для одновременного обеспечения подобия в циркуляции расплава и в характере распространения струй в ванне печи Ромелт диаметр фурмы на модели $d_0^{mod.}$ должен определяться из требования $Gn=idem$, причем входящий в критерий Глинкова расход дутья на модели $Q_{mod.}$, должен рассчитываться из условия $Fr_m^* = idem$:

$$Q_{mod.} = \delta^{\frac{5}{2}} Q_0 \left(\frac{P_{атм.}}{P_{ср.}} \right) * \left(\frac{T_{жс}}{T_0} \right) \quad (1)$$

$$d_0^{mod.} = d_0 * \left(\frac{T_{жс}}{T_0} \right)^{\frac{1}{2}} * \delta * \left[\frac{\rho_{жс} \rho_2^{mod.} (P_{атм.} + \rho_{жс} gh) P_{атм.}}{\rho_{жс}^{mod.} \rho_2 (P_{атм.} + \rho_{жс} g(h/2))^2} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

где Q_0 - расход дутья, подаваемого через фурму в образце, $\text{нм}^3/\text{с}$; $P_{ср.}$ - среднее гидростатическое давление в слое над фурмой, Н/м^2 ; $P_{атм.}$ - атмосферное давление, Н/м^2 ; $T_{жс}$ - температура жидкости, К; $T_0^0 = 273$ К; d_0 - диаметр фурмы в образце; δ - константа геометрического подобия. При этом масштаб изменения диаметра фурмы на модели отличается от принимаемого масштаба геометрического подобия для остальных линейных размеров.

В методике Мазумдара использование Fr_m^* в качестве единственного критерия динамического подобия оправдано только при выполнении условий автомодельности циркуляции жидкости по отношению к критерию Рейнольдса

$$Re = \frac{\rho_{см.} U_{см.} H}{\mu_{жс}} \approx \frac{\rho_{жс} (1 - \varphi) U_{см.} H}{\mu_{жс}} = \frac{\rho_{жс} U_{см.} h}{\mu_{жс}}, \quad (3)$$

т.е. в режиме, когда инерциальные силы в струе настолько превышают силы вязкого трения, что последние перестают сказываться на характере циркуляции (в (3) H - высота продуваемого слоя, φ - его газосодержание). Переход к автомодельному режиму наблюдается при соблюдении условия $Re > 4 * 10^5$. Если это условие не выполняется, необходимо соблюдать два условия: $Fr_m^* = idem$ и $Re = idem$. Соответственно, при моделировании продувки в печи Ромелт, в случае $Re < 4 * 10^5$ необходимо соблюдение условий: $Fr_m^* = idem$, $Re = idem$ и $Gn = idem$.

При выводе условий подобия для модельных частиц, имитирующих уголь в шлакоугольной суспензии, отдельно рассмотрели характер движения в шлаке мелких частиц угля («взвеси») и крупных частиц угля. Последние очень неравномерно распределяются по высоте ванны даже при высокой мощности перемешивания расплава, характерной для процесса Ромелт.

На основе анализа уравнения движения частицы взвеси методом сопоставления физических эффектов получили точные выражения критерия Рейнольдса Re_q для турбулентного потока, обтекающего взвешенную в нем твердую частицу с характерным диаметром, существенно меньшим -

$$Re_q = \left[\frac{|\rho_q - \rho_{жс}|}{\rho_{жс}} \right] * \left[\frac{d_q}{\lambda_0} \right]^3, \quad (4)$$

или существенно большим -

$$\text{Re}_q = \frac{|\rho_{жс} - \rho_q|^{\frac{1}{2}}}{\rho_q^{\frac{1}{6}} \rho_{жс}^{\frac{1}{3}}} * \left[\frac{d_q}{\lambda_0} \right]^{\frac{4}{3}}, \quad (5)$$

внутреннего масштаба турбулентности (λ_0) в системе.

Сформулировали условия подобия при моделировании суспензий из крупных твердых частиц при их сильно неоднородном распределении по высоте турбулентной жидкой ванны (случай, когда действие силы тяжести существенно влияет на движение частиц). Принимая, что такие частицы должны заглубляться в объем ванны на модели и в образце подобным образом, на основе анализа уравнения движения показали, что выполнение условия $Ar_q = idem$ (Ar_q - критерий Архимеда для турбулентного потока, обтекающего частицу, обеспечивает подобие в распределении частиц по высоте ванны).

При заданном масштабе геометрического подобия частиц δ_q применение условия $Ar_q = idem$ позволяет определять необходимую вязкость модельной жидкости:

$$\mu_{мод.} = \mu \delta_q^{\frac{3}{2}} \left[\left| \frac{\rho_q^{мод.} - \rho_{жс}^{мод.}}{\rho_q - \rho_{жс}} \right| * \frac{\rho_{жс}^{мод.}}{\rho_{жс}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6),$$

и, наоборот, при выбранной модельной жидкости это условие позволяет определить масштаб геометрического подобия модельных частиц (при одновременном соблюдении требования $\text{Re} = idem$ (см. (3)).

Было также показано, что при соблюдении $\frac{\rho_q}{\rho_{жс}} = idem$ и равенстве масштабов геометрического подобия частиц и модели ($\delta_q = \delta$) для среднего по ванне расстояния между центрами модельных частиц L_q

$$L_q = d_q \left[\frac{1 - \beta}{V_{жс} \beta} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

геометрическое подобие с образцом соблюдается при равенстве как объемных (β (доли ед.)), так и массовых (C (доли ед.)) содержаний частиц суспензии в образце и на модели, т.е. при моделировании достаточно выполнения одного из требований: $C = idem$ или $\beta = idem$. В общем случае, при произвольном выборе масштаба подобия δ_q , при моделировании должно выполняться требование $L_q = idem$.

Подобие в смачиваемости частиц жидкостью на модели и в образце обеспечивается соблюдением требования $\theta = idem$ (где θ – краевой угол смачивания).

Было также показано, что при моделировании продувки суспензии в процессе Ромелт соблюдение равенства на модели и в образце критериев Вебера и Маха не обязательно.

Глава 3. Параметры физической модели ванны печи Ромелт и методика проведения экспериментов.

При расчете параметров физической модели использовали следующие характеристики печи и процесса Ромелт в режиме стабильной плавки («базовый режим») с производительностью 8 т металла в час):

Геометрические параметры: ширина ванны в фурменной зоне - 2,5 м; угол раскрытия ванны в верхней ее части - 20°; межфурменное расстояние - 0,8 м; число барботажных фурм - 16; высота пояса фурм от уровня подины - 1,5 м; высота спокойного шлака над осью фурмы - 0,8 м; толщина ванны металла на подине - 0,5 м; расстояние от крайней фурмы до торца печи - 1,2 м; диаметр фурм - 0,03 м; общее содержание частиц угля в ванне - 1-3% от массы ванны; диаметр частиц угля, ограниченно замешивающихся в глубину ванны: 7-14 мм (частицы меньших размеров образуют взвесь).

Физические параметры: плотность газа на выходе из фурмы - 1,66 кг/м³ (использовали кислородовоздушное дутье (70% O₂), гидростатическое давление на уровне фурм ~1,2 атм.); плотность шлака - 2650 кг/м³; плотность частиц ококсированного угольного остатка - 900 кг/м³; вязкость шлака при $T_{шт}=1450^{\circ}\text{C}$ - 0,4-0,5 Па*с; краевой угол смачивания частиц угля шлаком - 135°.

Динамические параметры: скорость газа на срезе сопла фурмы - 205 м/с (расход дутья - 625 нм³/с).

При моделировании поведения «крупных» частиц угля, сконцентрированных преимущественно в верхней части барботируемой шлаковой ванны, использовали следующую совокупность критериев подобия:

$$\left\{ Fr_m^*, Re, G, Ar_c, H, \frac{X_i}{X_0}, \frac{\rho_c}{\rho_{ж}}, C \right\} \quad (8)$$

где X_i - линейные параметры печи (кроме диаметра сопел фурм) и характерный размер частиц, X_0 - базовый размер (за него взяли ширину ванны). Отдельно выделен симплекс $H = \frac{h}{X_0}$ - относительная высота ванны над уровнем фурм.

При моделировании поведения мелких частиц угля, взвешенных в объеме барботируемой шлаковой ванны, использовали совокупность критериев подобия:

$$\left\{ Fr_m^*, Re, G, H, Re_c, \frac{X_i}{X_0}, \frac{\rho_c}{\rho_{ж}}, C \right\} \quad (9)$$

Расчетные значения параметров физической модели при масштабе 1:20 (базовый вариант) и их вариация в экспериментах (дана в скобках) составили:

- расход дутья на 1 фурму - 37,5 л/мин (26,25, 48,75 л/мин);
- диаметр фурмы - 4,4 мм (4,0 и 5,0 мм);
- высота ванны над боковыми фурмами - 40 мм (20 и 80 мм);
- модельные частицы - измельченная парафинированная пробка плотностью 320 кг/м³;
- общее количество частиц в ванне ($C_{общ.}$) - 1-3% (1... 9% от массы ванны);
- фракция «взвеси» - 0-0,35 мм, фракция «крупных» модельных частиц - 0,35-0,7 мм (в опытах использовали три фракции, перекрывающие весь диапазон размеров частиц: 0-0,5 мм, 0,5-1,25 мм и 2,0-2,5 мм);

- модельная жидкость: 20%-ный водоглицериновый раствор с $\rho=1052$ кг/м³ и $\mu=0,0018$ Па*с (вода с $\rho=1000$ кг/м³, $\mu=0,001$ Па*с и 65%-ный водоглицериновый раствор с $\rho=1165$ кг/м³ и $\mu=0,01554$ Па*с).

Диапазон изменения безразмерных параметров в опытах, в сравнении с их значениями для характерных стабильных режимов работы печи, представлен на табл. 1.

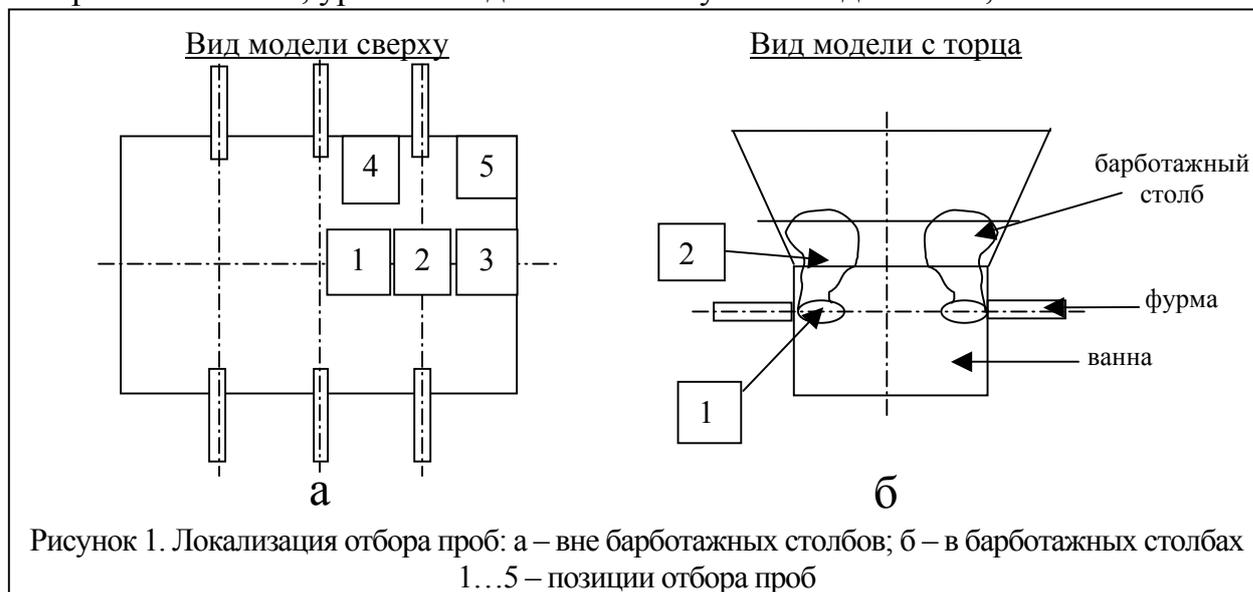
Таблица 1 - Диапазон изменения безразмерных параметров в опытах и при стабильных режимах работы печи Ромелт

Величины	Значения	
	Печь Ромелт (НЛМК)	Модель
Fr_m^*	3,1	2,2-5,7
Re	21000	24400-29900
G	3,4	2,6-8,9
$Re_{\text{ч}} (d_{\text{ч}} \ll \lambda_0)$	0,0-0,66	0,0-0,83
$Re_{\text{ч}} (d_{\text{ч}} \gg \lambda_0)$	0,97-16	1,13-18,70
H	0,8-1,2	0,5-1,5
$Ar_{\text{ч}}$	0,0028-499	36,43-26558
$C_{\text{общ}}$	0,005-0,035	0,010-0,090
$\frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho_{\text{ж}}}$	0,339	0,304

Экспериментальная установка состояла из модели рабочей камеры печи Ромелт, воздуходувной системы с газораспределительной станцией и измерительной аппаратуры. Модель рабочей камеры печи Ромелт выполнили в масштабе 1:20.

Отбор проб суспензии для определения локального массового содержания частиц в жидкости осуществляли при помощи сконструированного поршневого зонда. Пробы отбирали вне барботажных столбов в пяти характерных зонах ванны (поз. 1-5 на рис. 1а) из поверхностного слоя и с горизонта фурм. В барботажных столбах пробы отбирали на уровне ввода дутья в ванну (позиция 1, рис. 1б) и на уровне середины барботажного столба (позиция 2, рис. 1б).

Погрешность определения массового содержания частиц в экспериментах не превышала 15%, уровень надежности полученных данных 0,95.

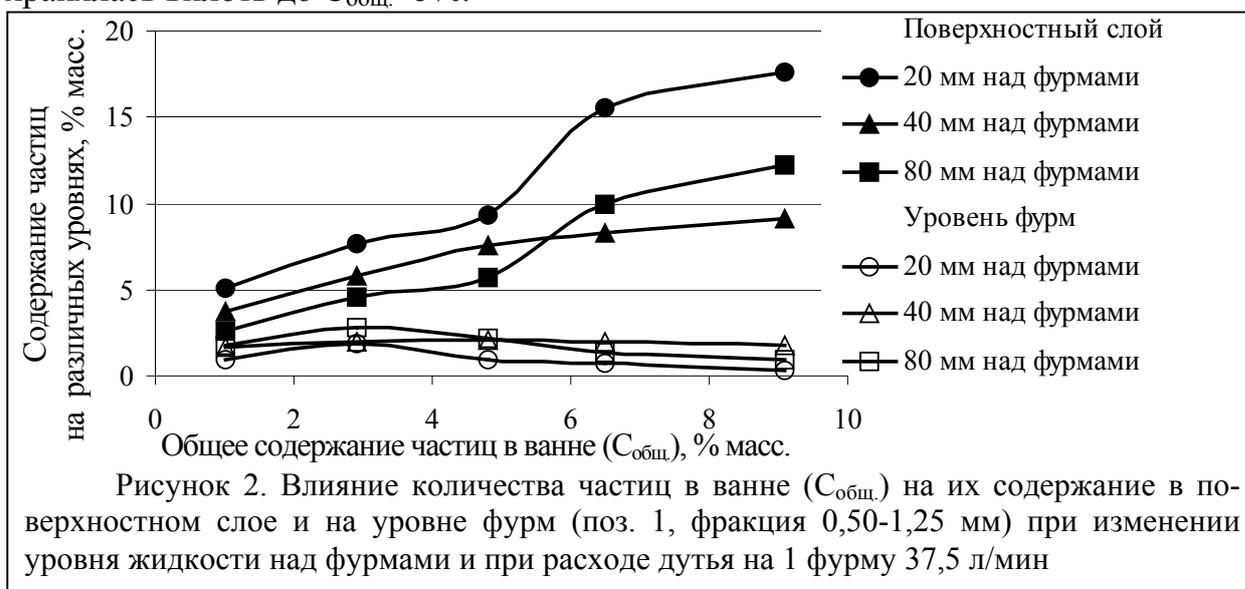


Глава 4. Исследование гидродинамики шлакоугольной суспензии процесса Ромелт на физической модели.

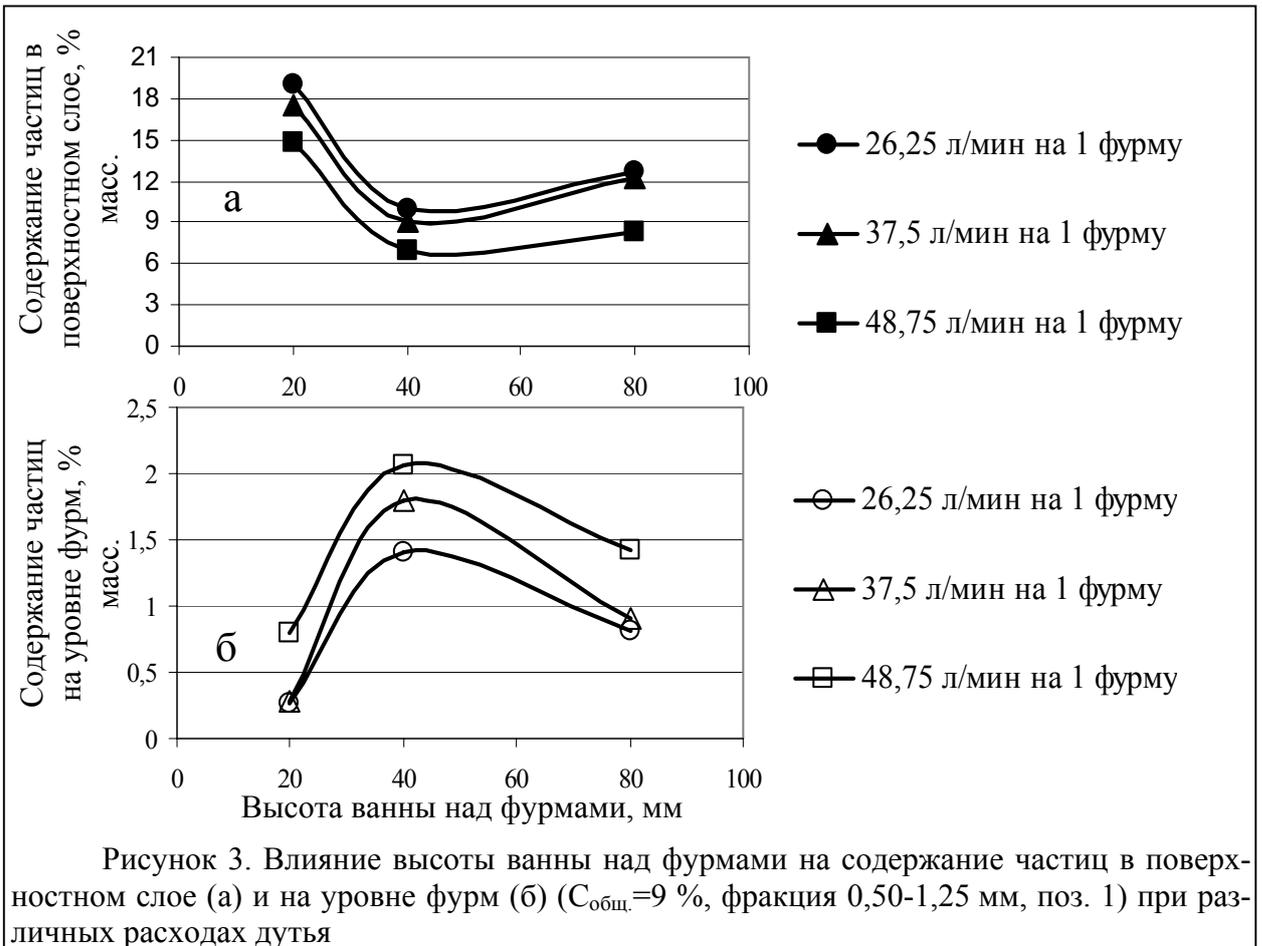
В экспериментах на физической модели изучили влияние интенсивности продувки, высоты ванны над фурмами, диаметра фурм, количества частиц в ванне, их крупности, а также вязкости жидкости на содержание частиц в поверхностном слое и на уровне барботажных фурм, как вне барботажных столбов, так и внутри них. По этим данным судили о характере и эффективности замешивания частиц в объеме ванны.

При эффективном замешивании угля более полно используется объем ванны как реакционной среды для восстановления железа из шлака, более эффективно происходит горение частиц угля на фурмах, обеспечивается интенсивная передача тепла к ванне из зоны дожигания. Критерием эффективности замешивания угля является более равномерное его распределение по высоте ванны.

Анализ экспериментальных данных показал, что при малых количествах ($C_{\text{общ.}}=1-3\%$) частиц в ванне (что было характерно для плавков на опытно-промышленной печи Ромелт (НЛМК)) при расходах дутья 37,5 л/мин (рис. 2) и 26,25 л/мин содержание частиц на уровне фурм при изменении высоты ванны практически не изменялось. В то же время, в поверхностном слое самое низкое содержание частиц было при максимальном уровне жидкости над фурмами (80 мм), а наибольшее (примерно в 2 раза выше) - при минимальном уровне (20 мм). При расходе на фурму 48,75 л/мин (при $C_{\text{общ.}}=1-3\%$) самая низкая эффективность замешивания частиц в объеме ванны наблюдалась при наименьшей высоте ванны. При этой интенсивности продувки и высотах ванны 40 и 80 мм содержания частиц в поверхностном слое были близки к содержаниям частиц на уровне фурм, т.е. достигалось практически равномерное распределение частиц в объеме ванны. При наибольшей высоте ванны (80 мм) такое распределение частиц сохранялась вплоть до $C_{\text{общ.}}=5\%$.



По мере увеличения общего количества частиц в ванне, при всех расходах дутья наилучшее замешивание достигалось при среднем уровне жидкости (40 мм). Зависимость эффективности замешивания частиц от высоты жидкости над фурмами при большом количестве частиц в ванне носит экстремальный характер (рис. 3).

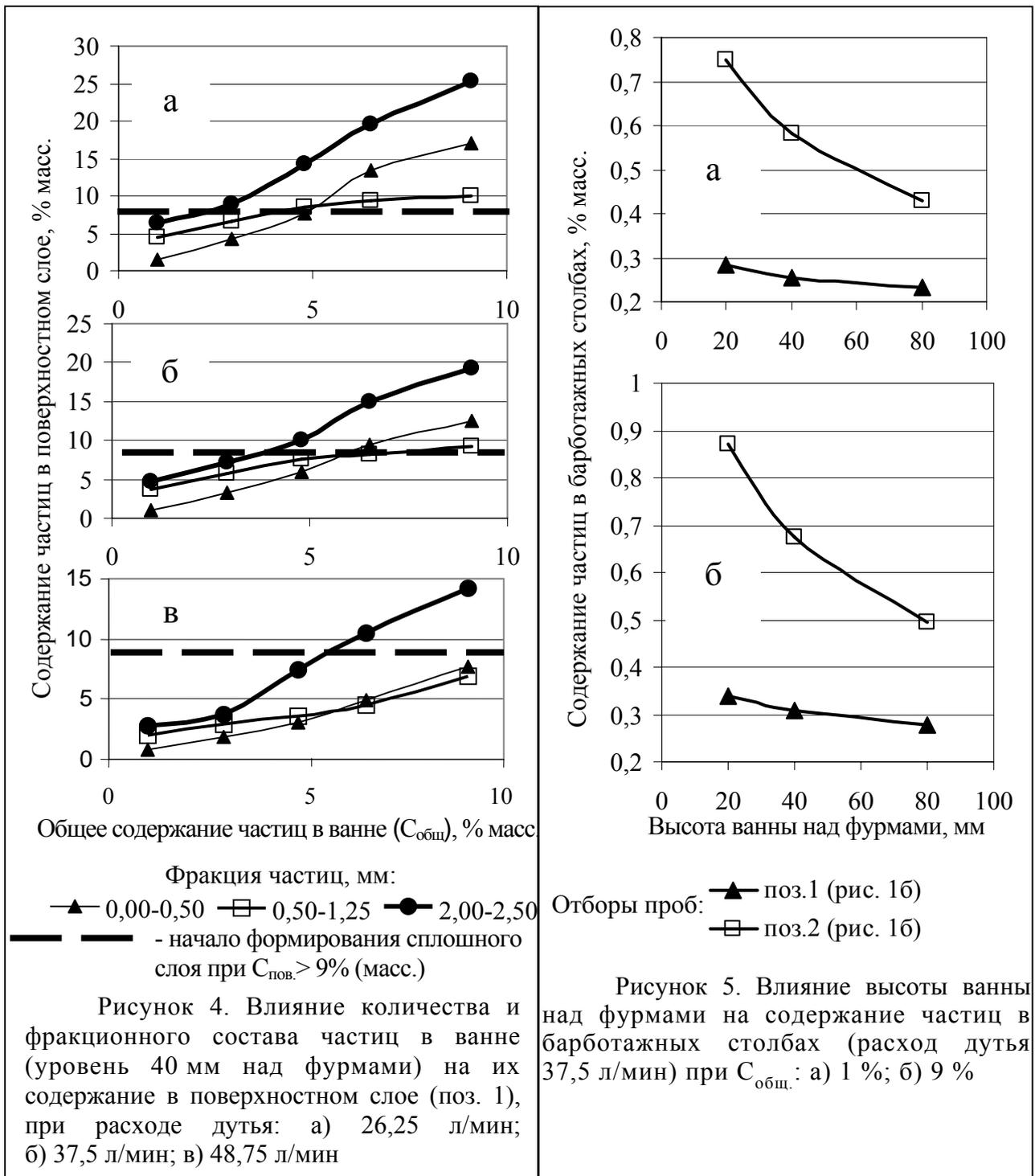


Установили, что при относительно малых количествах модельных частиц в ванне (до $C_{\text{общ.}}=5\%$), частицы мелкой фракции замешиваются в объем ванны наиболее эффективно (рис. 4).

При избыточном накоплении угля в шлаковой ванне на ее поверхности формируется «сплошной» слой из угольных частиц. Это приводит к блокировке теплопередачи к ванне от зоны дожигания. Поэтому на модели изучили условия образования такого слоя. Установили, что при высоком содержании частиц в поверхностном слое (что отвечает $C_{\text{пов.}}>9\%$ (масс.)) в центральных областях ванны, частицы суспензии образуют «сплошной» слабоперемешиваемый слой в верхней части ванны. Формирование сплошного слоя сопровождается значительным снижением интенсивности движения жидкости в поверхностном слое ванны. Сплошной слой появлялся при среднем по ванне содержании частиц $C_{\text{общ.}}>5\%$.

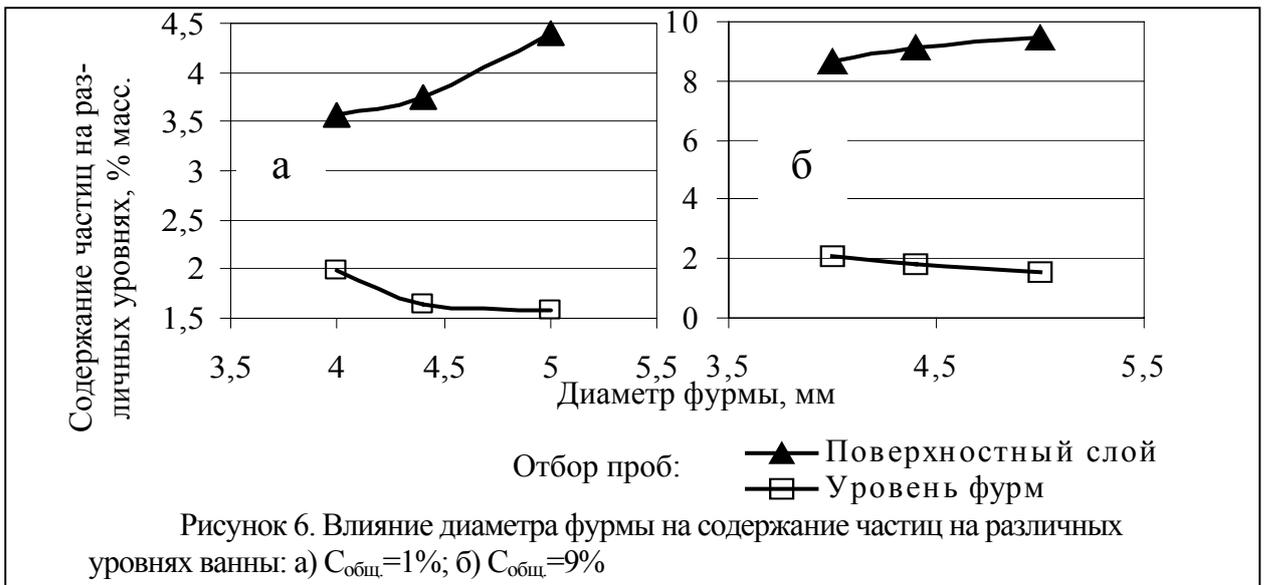
Формирование сплошного слоя начинается у торцов модели. Из этих зон при дальнейшем увеличении количества твердых частиц сплошной слой распространяется на пристенные зоны между фурмами (поз. 4, рис. 1а), откуда переходит в центральную часть ванны (поз. 1). При всех режимах сплошной слой не образуется в центральной части ванны на осевой линии противоположных фурм (поз. 2).

Установили, что с увеличением расхода дутья замешивание частиц в объеме ванны становится более эффективным, формирование сплошного слоя наступает позднее (рис. 4). При наибольшем расходе дутья (48,75 л/мин) и высоте ванны над фурмами 40 (рис. 4) и 80 мм в суспензиях из частиц мелкой или средней фракции, независимо от количества частиц в ванне, режим «сплошного» слоя не достигается.



Для процесса Ромелт необходимо, чтобы угольные частицы интенсивно вовлекались в барботажные столбы. Установлено, что содержание модельных частиц в них существенно ниже, чем в остальном объеме ванны. Это различие более выражено в верхних горизонтах ванны. Увеличение количества частиц в ванне практически не изменяет содержание частиц в верхней части барботажных столбов. Во всем диапазоне содержаний частиц с увеличением уровня жидкости над фурмами содержание частиц в верхней части барботажных столбов уменьшается (рис. 5), а в нижней части барботажных столбов практически не изменяется.

Увеличение интенсивности продувки приводит к небольшому снижению содержания частиц в верхней части барботажных столбов.



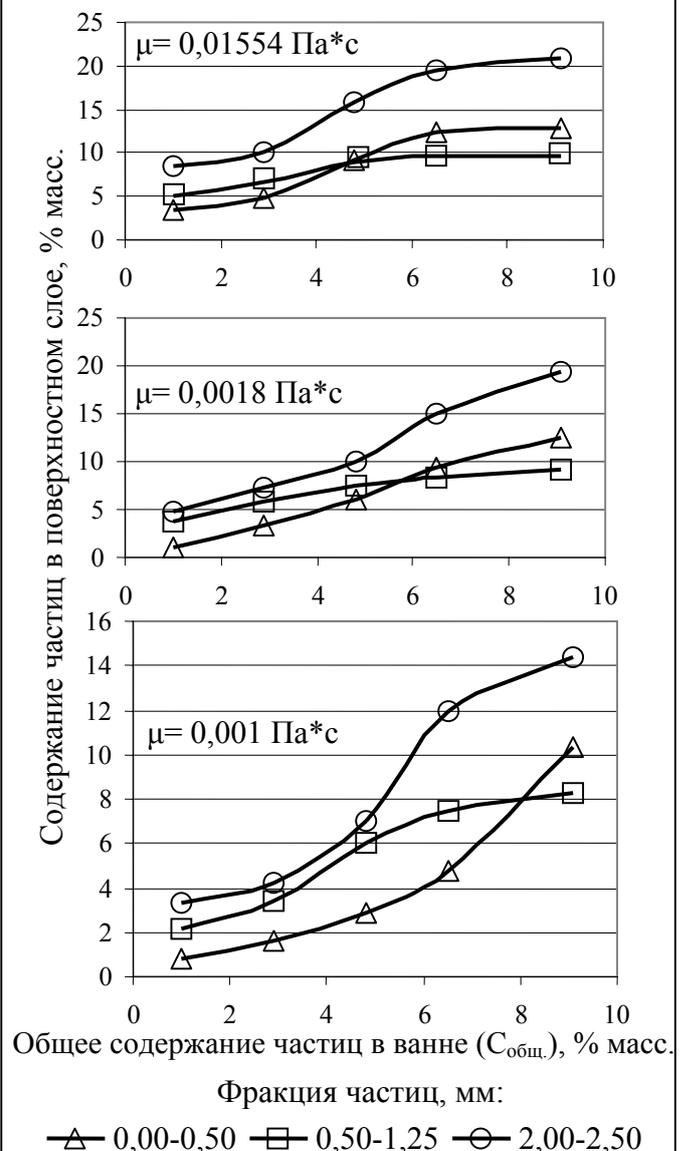
Установили, что увеличение скорости ввода дутья улучшает замешивание частиц в объем ванны (рис. 6). Характер изменения содержания частиц, как в поверхностном слое, так и на уровне фурм, с изменением насыщенности суспензии, при разных диаметрах фурм, практически одинаков.

Изучили влияние вязкости жидкости на эффективность замешивания частиц в объем ванны, так как в реальном процессе вязкость шлака можно изменять в широких пределах.

Установили, что наилучшая эффективность замешивания частиц всех фракций в объем ванны достигается при вязкости модельной жидкости $1,0-1,5 \cdot 10^{-3}$ Па*с, что соответствует вязкости шлака $0,23-0,35$ Па*с.

При больших вязкостях модельной жидкости эффективность замешивания снижается (рис. 7).

Установили, что при любой вязкости жидкости, при количествах частиц в ванне меньших некоторого критического, эффективнее замешиваются в объем ванны частицы мелкой фракции (рис. 7). При больших количествах твердых частиц в ванне эффективнее замешиваются частицы средней фракции.

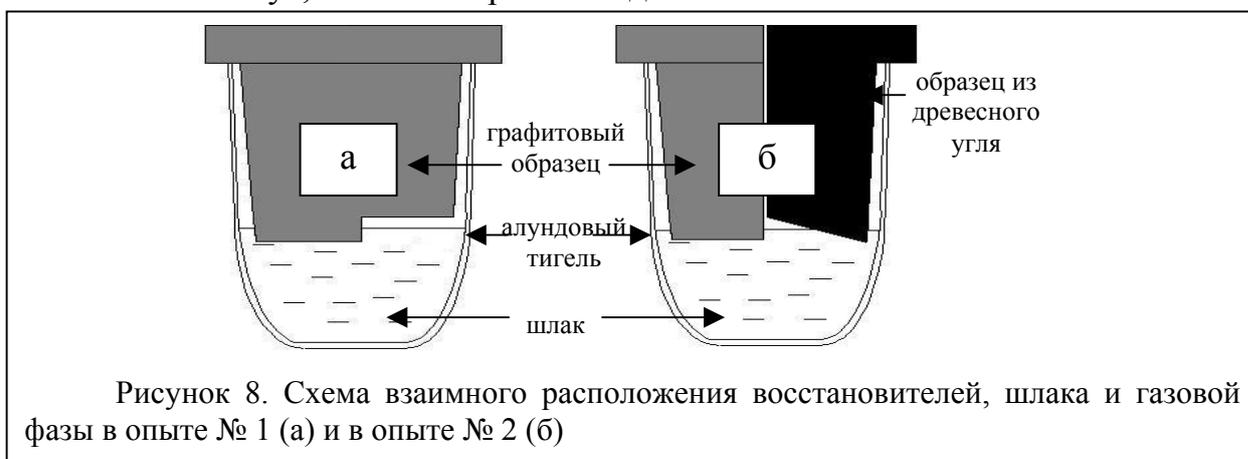


Глава 5. Исследование механизма и кинетики жидкофазного восстановления железа дисперсным твердым углеродом.

Дисперсный уголь, замешанный в объем шлаковой ванны, является основным восстанавливающим агентом, который может реагировать со шлаком непосредственно, или через газовую фазу в пузырьках. Выяснение преобладающей схемы восстановления важно для исследования кинетических возможностей процесса.

Экспериментально были реализованы условия, когда можно сравнить эффективность одновременного действия обоих возможных схем жидкофазного восстановления.

Подготовленные тигли с углеродистыми образцами и шлаком (рис. 8) нагревали в восстановительной атмосфере до температуры 1450 °С, выдерживали в течение 10 минут, затем быстро охлаждали.



В опытах первого типа (рис. 8а) форму и размеры графитового образца выбирали таким образом, чтобы после расплавления шлака часть образца была погружена в него на 1-2 мм, а другая часть находилась над поверхностью расплава на таком же расстоянии. В опытах второго типа (рис. 8б) в шлак были погружены два сложенных вместе образца из различных восстановителей - графита и древесного угля. Нижний торец образца из древесного угля был скошен таким образом, чтобы одна часть его поверхности находилась в шлаке, а другая - над шлаком. При этом расстояние от поверхности шлака до поверхности твердого восстановителя изменялось от 0 до 2 мм. Это сделали для того, чтобы смоделировать условия восстановления по двухстадийной схеме в пузырьках диаметром 0-2 мм. Вид поверхностей восстановителей после опытов приведен на рис. 9.

На поверхности шлака, где контакта с твердым восстановителем не было, видимых глазом капель металла очень мало. Практически нет их и в объеме шлака. Вся поверхность, как графита, так и древесного угля, находившаяся в контакте со шлаком, покрыта каплями металла. На скошенном торце образца из древесного угля имеется резкая граница. На той части образца, которая не контактировала со шлаком, капля металла нет. Это позволяет сделать вывод, что в процессах жидкофазного восстановления, схема, предполагающая преимущественное восстановление через газовую фазу, где роль твердого углерода сводится только к образованию СО, играет незначительную роль.

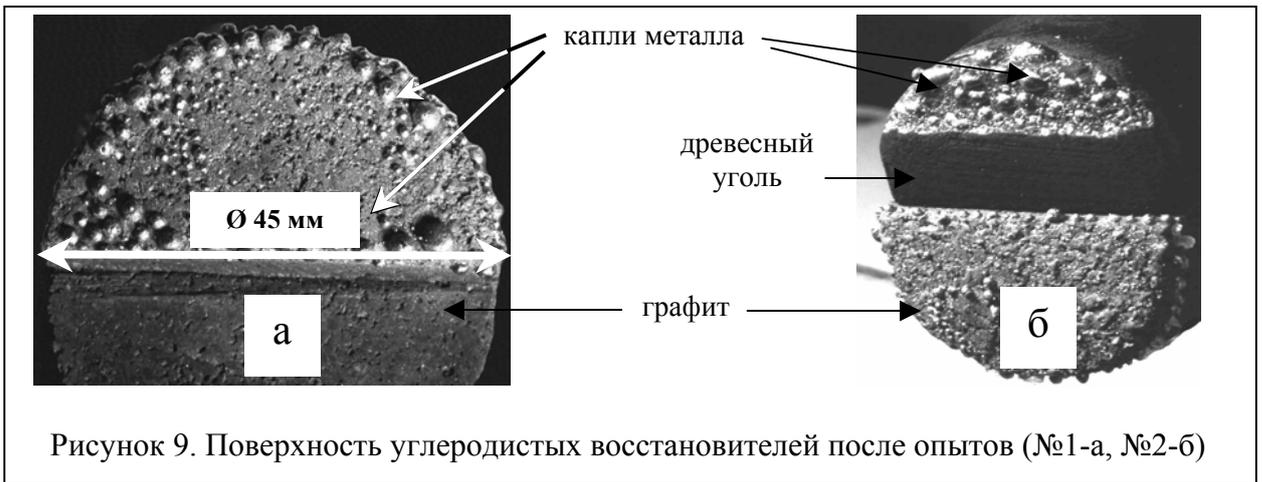


Рисунок 9. Поверхность углеродистых восстановителей после опытов (№1-а, №2-б)

В процессе Ромелт угольные частицы разных размеров по-разному блокируются пузырями от прямого контакта со шлаком, поэтому кажущаяся константа скорости восстановления по суммарной реакции не может быть определена отнесением скорости реакции к площади поверхности частиц восстановителя. Для кинетического анализа таких систем предположили, что при достаточно большом измельчении частиц угля скорость реакции определяется не величиной межфазной поверхности, как для гетерогенных реакций, а количеством «активных центров» или реагирующих частиц, как для гомогенных реакций. Соответствующее формально-кинетическое уравнение восстановления железа принимает вид:

$$\frac{M_{\text{шл.}}}{100} \frac{d(FeO)}{dt} = -k_n (FeO)^\alpha n \quad (10)$$

где (FeO) - концентрация оксида железа в шлаке (% масс.); $M_{\text{шл.}}$ - масса шлака (кг); k_n - кажущаяся константа скорости реакции (кг(FeO)/с); α - порядок реакции, n - количество частиц восстановителя в шлаке.

Константа скорости реакции при таком подходе представляет собой количество FeO, восстанавливаемое за 1 секунду одной частицей восстановителя из шлака с концентрацией (FeO) , равной 1%.

Решение (10) в предположении первого порядка реакции дает:

$$-\frac{m_c}{(C_0)} \ln \left(\frac{(FeO)}{(FeO_0)} \right) = k_n t \quad (11)$$

где m_c - начальная средняя масса частицы восстановителя данной фракции (кг); (C_0) - начальное содержание восстановителя в шлаке, (в % от массы шлака). Из

(11) видно, что в координатах $\frac{m_c}{(C_0)} \ln \left(\frac{(FeO_0)}{(FeO)} \right) - t$ по углу наклона прямой к оси абсцисс можно определить кажущуюся константу скорости реакции k_n .

Поскольку разные фракции восстановителя в одной и той же гидродинамической обстановке могут с разной эффективностью контактировать со шлаком (блокироваться пузырями), можно ожидать, что и кажущаяся константа скорости их реагирования со шлаком будет изменяться в зависимости от размера частиц. Экспериментально определенные кажущиеся константы скорости

реагирования для разных фракций твердого дисперсного восстановителя со шлаком могут быть использованы в кинетических расчетах для определения интегральных скоростей в реакторах жидкофазного восстановления железа и для их прогноза при изменении размеров частиц используемого восстановителя.

Опыты по исследованию кинетики жидкофазного восстановления железа дисперсным графитом провели на печи Таммана. Суспензия в тигле перемешивалась с разной интенсивностью аргоном. Опыты провели при трех температурах (1673 К, 1723 К и 1773 К) с использованием графита фракций 0,63-0,80 мм и 1,60-2,00 мм.

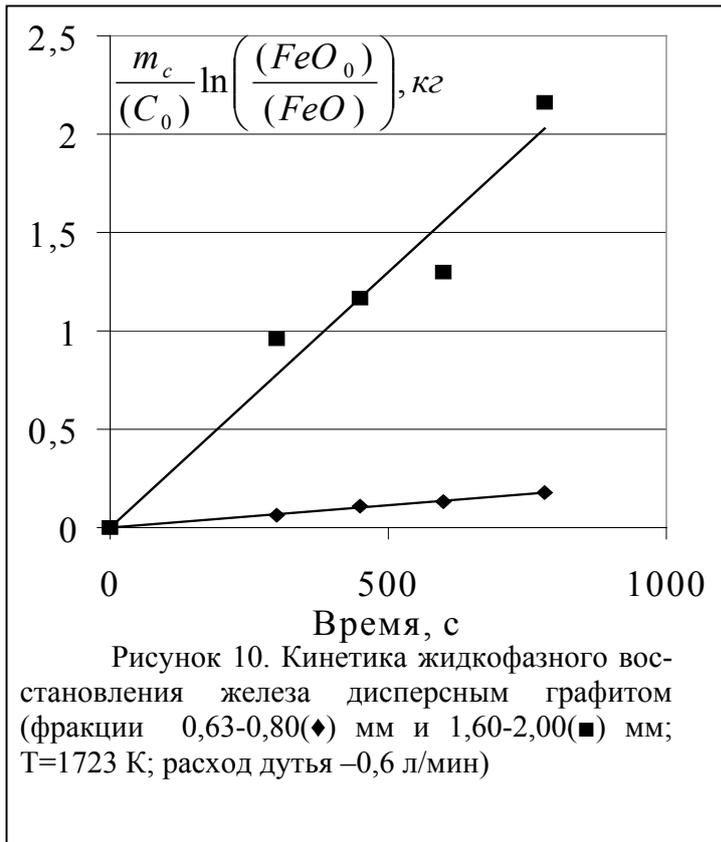


Рисунок 10. Кинетика жидкофазного восстановления железа дисперсным графитом (фракции 0,63-0,80(♦) мм и 1,60-2,00(■) мм; T=1723 К; расход дутья –0,6 л/мин)

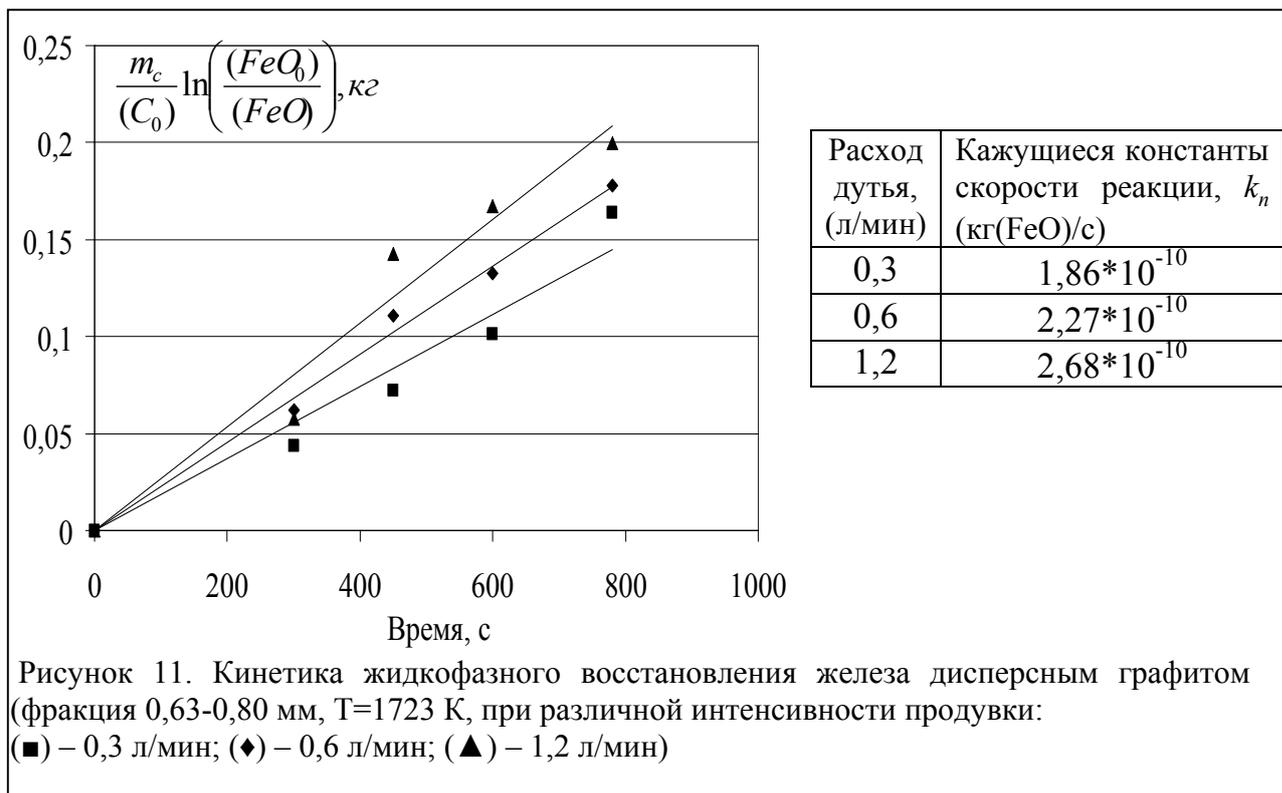
Результаты обработки по (11) экспериментальных данных при T=1723 К представлены на рис. 10. Линейность графиков показывает, что реакция имеет первый порядок по (FeO). Кажущиеся константы скорости реакции составили: для фракции 0,63-0,80 мм - $2,27 \cdot 10^{-10}$ (кг(FeO)/с), для фракции 1,60-2,00 мм - $2,60 \cdot 10^{-9}$ (кг(FeO)/с).

Таким образом, различие гидродинамических условий у поверхности частиц графита двух фракций, отличающихся приблизительно в 2,3-2,5 раза по линейным размерам, действительно приводит к качественному (на порядок), изменению кажущейся константы скорости восстановления, которая больше для более крупных частиц.

Для оценки энергии активации реакции E_a проведены опыты с использованием частиц графита размером 0,63-0,80 мм при трех температурах: 1673 К, 1723 К и 1773 К.

Кажущиеся константы скорости реакции соответственно составили: $2,05 \cdot 10^{-10}$, $2,27 \cdot 10^{-10}$ и $2,75 \cdot 10^{-10}$ (кг(FeO)/с). Среднее значение энергии активации составило $E_a=62000$ Дж/моль. Учитывая комплексный характер восстановления, протекающего в системе одновременно по двум схемам, полученная величина энергии активации не может самостоятельно характеризовать лимитирующую стадию процесса. Этот вопрос нуждается в дальнейшем изучении.

Установили, что увеличение интенсивности перемешивания расплава (рис. 11) приводит к увеличению кажущихся констант скорости восстановления дисперсным графитом.



Оценка производительности печи по предложенной методике показала, что в процессе Ромелт целесообразно использовать мелкий уголь. Это совпадает с выводами, полученными при моделировании гидродинамики шлакоугольных суспензий.

Глава 6. Разработка рекомендаций по совершенствованию технологии процесса Ромелт.

На основании анализа экспериментальных данных, полученных при моделировании гидродинамики шлакоугольной суспензии процесса Ромелт выделили параметры гидродинамического режима, при которых обеспечивалось наилучшее замешивание модельных частиц в объем ванны. С использованием полученной совокупности критериев подобия произвели полный расчет соответствующих параметров рекомендуемого гидродинамического режима печи Ромелт.

Показано, что при поддержании обычных для практики процесса уровней (FeO)~3% и $C_{\text{общ.}} \sim 3\%$, а также сохранении температурного режима плавки, можно обеспечить удвоение производительности печи (в сравнении с изучавшимся базовым режимом) при увеличении высоты ванны над фурмами в 2 раза (за счет удвоения количества частиц в ванне). Переход при этом на работу с более окисленным шлаком – до (FeO)~6% может обеспечить увеличение производительности в 4 раза. Согласованные с увеличенной в 2 (или в 4) раза скоростью подачи в печь окисленного железосодержащего сырья, расходы угля и кислорода, рассчитываются из материального и теплового баланса плавки.

Повышение производительности печи путем увеличения содержания угля в ванне считается бесперспективным, поскольку количество накопленного в ванне угля трудно контролировать и процесс может перейти в технологически неприемлемый режим блокировки углем поверхности ванны. Однако проведенные модельные исследования показали, что этот режим можно исключить при

переходе к большей интенсивности продувки и большей глубине ванны, при использовании угля обычной для процесса крупности. Исходя из этого, общее содержание угля в ванне ($C_{\text{общ.}}$) может быть увеличено с 3% до 6% и даже до 9% от массы ванны, что открывает возможности существенного увеличения скорости восстановления железа в печи.

Проведенный анализ данных по моделированию гидродинамики шлакоугольной суспензии и кинетики жидкофазного восстановления железа дисперсным твердым углеродом позволил сформулировать следующие рекомендации по повышению производительности процесса Ромелт на основе совершенствования гидродинамического режима шлакоугольной суспензии:

1. Уровень спокойного шлака над барботажными фурмами целесообразно увеличить с 0,7-0,8 до 1,4-1,6 м;
2. Расход дутья на фурму следует увеличить с 600-650 $\text{нм}^3/\text{ч}$ до 950-1000 $\text{нм}^3/\text{ч}$;
3. Диаметр сопел барботажных фурм следует оставить неизменным – 30 мм, при этом скорость дутья на выходе из фурмы увеличится с 205 до 265 м/с;
4. Размеры угольных частиц в ванне должны быть менее 20 мм;
5. Содержание угля в ванне должно быть 5-9% от массы ванны;
6. Концентрация FeO в шлаке должна быть 5-6%;
7. Вязкость шлака в печи целесообразно поддерживать на уровне 0,2-0,4 Па*с, повышение вязкости шлака выше 3,0 Па*с нежелательно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены следующие основные результаты:

1. Разработана методика обеспечения динамического подобия при физическом моделировании продувки ванны печи Ромелт. Определены условия подобия для частиц, моделирующих угольную взвесь в турбулентном шлаковом расплаве. Определены условия подобия для частиц, моделирующих крупные частицы угля в сильно неоднородных по высоте ванны шлакоугольных суспензиях;
2. Рассчитаны параметры и создана физическая модель, разработана методика экспериментального исследования структуры барботируемой шлакоугольной суспензии;
3. Установлено, что при малых количествах (1-3% от массы ванны) частиц (что характерно для процесса Ромелт), эффективность замешивания частиц в объем ванны возрастает при увеличении высоты ванны над фурмами; увеличении расхода дутья на фурму; увеличении скорости дутья (при постоянном его расходе); при использовании частиц мелкой фракции (при количестве модельных частиц в ванне до 5% (от массы ванны)); а также при пониженной вязкости жидкости.
4. Установлено, что при высоком содержании частиц в поверхностном слое ($C_{\text{пов.}} > 9\%$ (масс.)) в центральных областях ванны частицы суспензии образуют сплошной слабо перемешиваемый слой в верхней части ванны. Критическое насыщение поверхностного слоя $C_{\text{общ.}}^{\text{крит.}}$ появлялось при общем содержании час-

тиц в ванне $C_{\text{общ.}} > 5\%$. Конкретное значение $C_{\text{общ.}}^{\text{крит.}}$ определялось гидродинамическим режимом ванны. При одновременном увеличении высоты ванны и интенсификации ее продувки в суспензиях из модельных частиц мелкой и средней фракций сплошной слой не образовывался при любых насыщениях суспензии.

5. Установлено, что в барботажных столбах содержание модельных частиц ниже, чем в остальном объеме ванны. Это различие более выражено в верхних горизонтах ванны. Во всем диапазоне содержаний частиц в жидкости с увеличением высоты ванны над фурмами (при одинаковом расходе дутья) содержание частиц в верхней части барботажных столбов уменьшается, а на уровне фурм практически не изменяется. Увеличение расхода дутья влечет за собой незначительное снижение содержания частиц в верхней части барботажных столбов;

6. Экспериментально подтверждена определяющая роль в восстановлении железа в шлакоугольных суспензиях схемы прямого восстановления в одну стадию;

7. Разработана методика анализа кинетики жидкофазного восстановления железа дисперсным твердым восстановителем с определением константы скорости реакции, отнесенной к одной частице восстановителя;

8. Экспериментально установлено, что реакция восстановления железа из шлака дисперсным графитом имеет первый порядок по (FeO). Кажущиеся константы скорости восстановления железа в шлакографитовых суспензиях при $T=1723$ К и расходе газа на продувку 0,6 нл/мин составили: для фракции 0,63-0,80 мм - $2,27 \cdot 10^{-10}$ (кг(FeO)/с), для фракции 1,60-2,00 мм - $2,60 \cdot 10^{-9}$ (кг(FeO)/с);

9. Установлено, что кажущиеся константы скорости восстановления в шлакографитовых суспензиях зависят не только от размеров частиц и температуры, но и от интенсивности перемешивания расплава. При $T=1723$ для фракции 0,63-0,80 мм они составили: при расходе дутья 0,3 л/мин - $1,86 \cdot 10^{-10}$ (кг(FeO)/с), при расходе дутья 0,6 л/мин - $2,27 \cdot 10^{-10}$ (кг(FeO)/с) и при расходе дутья 1,2 л/мин - $2,68 \cdot 10^{-10}$ (кг(FeO)/с);

10. Разработаны практические рекомендации по увеличению производительности процесса Ромелт на основе совершенствования гидродинамического режима шлакоугольной суспензии.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Баласанов А.В., Колесников Ю.С., Лехерзак В.Е., Усачев А.Б. О механизме жидкофазного восстановления железа твердым углеродом // Известия ВУЗов. Черная металлургия. 2005. - №7. – С. 10-13.

2. Лехерзак В. Е., Усачев А. Б., Баласанов А. В., Колесников Ю.С. Кинетика жидкофазного восстановления железа дисперсным твердым углеродом // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 2006. - №7. – С. 5-9.

3. Колесников Ю. С., Усачев А. Б., Лехерзак В. Е., Баласанов А. В. Физическое моделирование шлакоугольной суспензии в высокотемпературном агрегате барботажного типа. - Сборник трудов 3-й Международной научно-

практической конференции «Металлургическая теплотехника: история, современное состояние, будущее. К столетию М. А. Глинкова» - Москва: МИСиС, 2006, С. 334-339.

4. Колесников Ю. С., Усачев А. Б., Лехерзак В. Е., Баласанов А. В. Принципы физического моделирования суспензий в высокотемпературных реакторах барботажного типа. – Сборник трудов 2-й Международной конференции “Прогрессивные технологии развития” – Тамбов, 2005, С. 92-95.

5. Колесников Ю. С., Лехерзак В. Е., Баласанов А. В., Усачев А. Б. Кинетика жидкофазного восстановления железа дисперсным твердым углеродом. - Сборник трудов 2-ой конференции молодых специалистов «Металлургия XXI века» - Москва, 2006, С. 27-33.

6. Колесников Ю. С., Усачев А. Б., Баласанов А. В., Лехерзак В. Е. О механизме восстановления железа в процессах утилизации отходов металлургического производства. – Сборник трудов 6-й Международной научно-практической конференции “Проблемы энергосбережения и экологии в промышленном и жилищно-коммунальном комплексе” – Пенза, 2005, С. 220-223.

7. Колесников Ю. С., Усачев А. Б., Лехерзак В. Е., Баласанов А. В., Роме-нец В. А. Физическое моделирование боковой продувки суспензии. – Сборник трудов 2-й Международной конференции “Составляющие научно-технического прогресса” – Тамбов, 2006, С. 66-72.