

ОТЗЫВ

официального оппонента Беляева Вячеслава Васильевича на диссертационную работу Колмачихина Бориса Валерьевича “Исследование процессов массообмена и оптимизация работы комплекса «Печь с погружной фурмой – внешний отстойник»”, представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов

Диссертационная работа Колмачихина Б.В. посвящена переработке медесодержащего сырья в стационарном агрегате с верхней подачей окислительного дутья через вертикальную фурму (печь Ausmelt) работающей в комплексе с печью-отстойником. Поиск возможных путей интенсификации, повышения технических показателей в этой цепи аппаратов определяет **актуальность** выполненных исследований.

Целью работы является разработка научно обоснованного режима продувки расплава в печи «Ausmelt», обеспечивающего повышение эффективности отстаивания и увеличения общей производительности работы системы аппаратов «печь с вертикальной фурмой – миксер».

Сформулированные **задачи исследований** состоят в следующем:

1 Изучение физико-химических свойств (вязкости, плотности) шлаков, получаемых в процессе плавки в печи с погружной фурмой и возможность их корректировки;

2 Анализ динамической обстановки в зоне образования факела дутья, выделение основных зон интенсивного массообмена и установление оптимальных режимов для минимизации диффузионных ограничений;

3 Изучение влияния интенсивности продувки ванны на крупность штейновых капель и качество разделения расплава в агрегате отстойнике.

Работа обладает **научной новизной**:

- на основе фундаментальных законов кинетики и с учетом формы и площади реакционной поверхности разработана методология математического описания процессов нестационарной диффузии применительно к гетеро-

генным реакциям в условиях подвижной границы раздела фаз для компонентов медный штейн-шлак-газовая фаза;

- установлено, что при использовании коаксиальной фурмы со встроенными завихрителями процесс обновления реакционной поверхности зависит от частоты пульсации дутья и радиальной скорости вращения погруженной струи относительно вертикальной оси. Получены уравнения, позволяющие количественно оценить интегральную величину контактной поверхности.

Необходимо отметить, что выполненная работа имеет практическую значимость:

- 1 Найдены предельные режимы дутья ($Ar < 50.2$), при которых не происходит измельчение штейновой фазы, отстаивание протекает в оптимальном режиме, что позволяет сохранить коэффициент извлечения меди при переработке шлаков на обогатительной фабрике;
- 2 С учетом выявленных закономерностей диффузионной кинетики разработана общая технологическая модель плавки, позволяющая в зависимости от заданной производительности определять необходимый объем дутья и может быть использована в качестве элемента системы АСУТП.
- 3 Определен резерв в увеличении производительности плавки в агрегате Ausmelt ЗАО «Карабашмедь», при сохранении плановых показателей извлечения меди в штейн.

Достоверность полученных результатов выполненных исследований основана на применении аттестованных физико-химических методик анализа с использованием сертифицированного аналитического оборудования (рентгено-флюоресцентный спектрометр - Shimadzu EDX-7000P; электронный микроскоп - JEM J2100; ротационный вискозиметр - вискозиметр Брукфильда LVT и др.). Использованы широко применяемые пакеты прикладных программ (MS OFFICE, STATISTICA, HSC Chemistry "ImageJ", "Neuroph", "WavePad").

Результаты диссертационной работы прошли **апробацию** на всероссийских и международных конференциях, а также при рецензировании научных статей, опубликованных в журналах, входящих в перечень периодических изданий, рекомендованных ВАК РФ.

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованных источников, состоящего из 72 наименований. Материалы диссертации изложены на 109 страницах машинописного текста, в том числе рисунков – 40, таблиц – 16.

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы, представлены объект, цель и задачи выполненных исследований, представлены основные положения, выносимые на защиту, сформулированы научная новизна, практическое значение работы.

В первой главе представлен анализ литературных данных о практике применения комплексов плавильных агрегатов с погружными фурмами и печей-отстойников различных видов. Показано, что потери меди при переработке сульфидных материалов, в значительной степени обусловлены ее механическими потерями на этапе разделения фаз в процессе отстаивания расплава. Рассмотрены известные методы моделирования для изучения работы агрегатов с погружными фурмами. Дана оценка ранее предпринятым попыткам совершенствования процесса за счет изменения состава флюсов.

Во второй главе представлен анализ физико-химических свойств и параметров процесса плавки сырья, составлен перечень основных реакций, для которых, с использованием пакета программ HSC Chemistry, был проведен расчет основных термодинамических параметров их протекания. С учетом выявленной последовательности химических превращений, фактического состава исходных шихтовых материалов и для формирования исходных данных об объемах и соотношениях шлака и штейна, с целью дальнейшего физического моделирования, был выполнен расчет материального и затем теплового балансов процесса.

Третья глава посвящена изучению процессов перемешивания и отстаивания расплавов в печи с погружной фурмой и печи-отстойнике методами холодного физического и математического моделирования.

В качестве модельных жидкостей для опытов избраны техническое масло и водный раствор хлористого натрия удовлетворяющие условию соответствия отношения плотностей между модельными жидкостями и расплавами в реальной системе ($\rho_{\text{шл}}/\rho_{\text{шт}}$) – idem.

Параметры дутьевого режима выбраны на основе расчета критериев подобия Рейнольдса и Архимеда, с учетом данных о работе реального агрегата. Полученные значения использовались для сопоставления с данными практики реального агрегата Ausmelt ЗАО «Карабашмедь» с целью подтверждения корректности выбранных режимов и условий моделирования. Допуски по отклонению критерия Рейнольдса в пределах $\pm 15\%$ при полном совпадении критерия Архимеда. Сопоставление показало, что диапазон дутья $0,0018 - 0,0027 \text{ м}^3/\text{с}$ на модельной установке соответствует имеющимся на практике режимам работы агрегатов с верхней погружной фурмой.

Эксперименты по холодному моделированию фиксировались при помощи видеосъемки с частотой 60 и 100 к/с и фотосъемки частотой 10 к/с .

Анализ фотоматериалов показал, что при продувке через фурму с завихрителем формируется стабильная фигура вращения при интенсивностях дутья до $8,14 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Рассчитанные на основе записи звука частоты пульсации сопоставляли с визуально наблюдаемым движением факела на фото- и видеозаписях. Отклонения результатов составили не более 1 пульсации за 10 секунд.

Данные фотоматериалов использовались для построения условных контуров струи, представляя ее форму как элементы цилиндра и поверхностей вращения симметричных кривых относительно вертикальных осей. Боковую площадь поверхности тел вращения автор определил по уравнению:

$$S_1 = 2\pi \int_m^n f(Y) \cdot \sqrt{1 + [f'(Y)]^2} dY,$$

где $f(Y)$ —функция кривых вращения.

Расчет пределов интегрирования осуществлялся с учетом теплового расширения реакционной зоны при средней температуре расплава 1300 °С.

Целью последующего этапа работы стала разработка математической модели процесса окисления сульфидов в условиях продувки расплава различными газовыми средами и определение на ее основе возможных оптимальных режимов дутья. При этом исследовались макрокинетические закономерности процесса окисления сульфидов во взаимосвязи с результатами холодного моделирования и типичными показателями работы комплекса аппаратов «Ausmelt».

В модели принят ряд допущений, позволяющих упростить описание и модель процесса.

Анализ данных математического моделирования свидетельствует о том, что наибольшее совпадение расчетных и экспериментальных данных наблюдается при $Ar=50,2$ в случае лимитирующей стадии со стороны массоотдачи серы в объеме расплава. Для оценки гидродинамических свойств газового потока в режиме газовой диффузии, был рассчитан критерий Рейнольдса, среднее значение которого в продольном Re_x и поперечном направлениях Re_y изменяется от 2387 ($Ar=10$) до 30728 ($Ar=94$), соответственно. Это указывает на турбулентное движение газа, при котором появление диффузионных затруднений в газовой фазе можно считать маловероятным. Резкое повышение массопереноса в обоих режимах при $Ar \geq 50,2$ обусловлено изменением геометрии реакционной зоны и, соответственно, траектории движения потока.

Далее автором были проведены опыты для оценки зависимости режима отстаивания от параметров продувки расплава. Процесс дробления, объединения и оседания полученных капель фиксировался на видео. Результаты опытов были обработаны посредством программных пакетов MS EXCEL и STATISTICA с получением ряда графиков и уравнений.

В качестве варьируемых параметров выступали интенсивность дутья и высота заглубления фурмы в ходе продувки. Через равные промежутки времени отбирались пробы модельных жидкостей с 4 уровней (верхний уровень расчетного штейнового слоя, близкий к границе раздела, нижний уровень штейнового слоя у дна установки, верхний уровень шлакового слоя у зеркала ванны, середина шлакового слоя) и производили их центрифугирование с последующим определением доли модельного штейна.

На основе полученных данных, а также ранее рассчитанных материального и теплового балансов, была построена математическая модель отстаивания, использующая в качестве основной расчетную формулу Стокса.

Полученные результаты указывают, что при продувке с малым заглублением фурмы даже экстремальный режим дутья (130% от реального) не позволяет обеспечить достаточного уровня перемешивания расплава и, соответственно, можно говорить о низкой эффективности усвоения кислорода ванной, в то время как при большем заглублении эффективное перемешивание достигается уже при малых значениях критерия Рейнольдса.

Увеличение интенсивности продувки при заглублении, идентичном реальному, приводит к дроблению капель штейна, что негативно сказывается на эффективности разделения – это видно по возрастающей доле тяжелой фазы в верхних слоях ванны. Оптимальными значениями Ar , с точки зрения режима отстаивания, остаются режимы до 50 включительно.

Автором установлено, что при перемешивании с интенсивностью продувки менее чем $Ar = 50,0$, 83% наблюдаемой тяжелой фазы, оседающей сквозь слой модельного шлака, приходится на капли размером от 0,2 мм и более. Дальнейшее увеличение интенсивности дутья приводит к резкому уменьшению крупности капель. При $Ar > 50$ преобладающим становится класс менее 0,2 мм (на него приходится 62% тяжелой фазы), что негативно сказывается на качестве разделения.

Были получены также образцы материалов (шлака и штейна), отобранные из печи-отстойника при двух разных режимах продувки на предприятии ЗАО «Карабашмедь» (соответствующих Ar – 50,2 и Ar – 63,0), которые были подвергнуты рентгено-флюоресцентному анализу и рассмотрены с использованием цифрового микроскопа.

Образец шлака, полученный при Ar=63, отличается заметно большим количеством механически вовлеченных сульфидных капель (приблизительно на 30%) при меньшей площади каждой из них в отдельности (в основном от 10 до 20 мкм против 40 мкм в среднем при Ar 50,2), что подтверждает гипотезу о переизмельчении частиц штейна при повышенной интенсивности продувки и коррелирует с результатами холодного моделирования.

В четвертой главе работы рассмотрена возможность интеграции созданной модели в существующую систему автоматизации с целью оповещения оператора о выходе процесса за рамки оптимального режима и предлагаются оптимальные параметры загрузки и дутьевого режима для перерабатываемого на данный момент набора сырья.

Математическое решение модели совместной работы комплекса «Печь с погружной фурмой-отстойник» позволило рассчитать предельные параметры работы системы агрегатов с переработкой концентрата материалов состава, указанного в главе 2:

Плавильная печь

Производительность по твердым материалам, СМТ, т/ч.....155

Расход технологического дутья, (КВС), м³/ч.....51700

Содержание кислорода в КВС,% об.....52

Миксер

Производительность, т/ч

по штейну.....42

по шлаку.....81

Содержание меди,% (по массе)

в штейне.....	48
в шлаке.....	2.5
Извлечение меди в штейн, %	91

Увеличение расхода дутья сверх указанной величины приводит к росту производительности плавки, но снижает извлечение меди в штейн за счет образования взвеси сульфидов в шлаке и роста механических потерь металла. Концентрация меди в шлаке становится более 4%, а коэффициент прямого извлечения меди снижается до величины 87% .

Следует отметить, что представленные исследования выполнены на современном научном, методическом и экспериментальном уровнях; содержат новые научные результаты и положения, выносимые на защиту; логически связаны между собой; отражают личный вклад диссертанта в науку и практику, что дает основание положительно оценить диссертационную работу Колмачихина Б.В. «Исследование процессов массообмена и оптимизация работы комплекса «Печь с погружной фурмой – внешний отстойник»».

Основные научные результаты опубликованы в ведущих рецензируемых периодических научных изданиях, входящих в список ВАК РФ.

Работа автора вносит определенный вклад в научное обоснование, разработку и совершенствование практических мер, направленных на повышение комплексности переработки многокомпонентного сульфидного сырья и увеличению производительности агрегатов с погружной фурмой.

Предложенные диссертантом новые научные подходы и технологические решения аргументированы и критически оценены в сравнении с известными положениями и разработками.

Диссертация оформлена в соответствии с требованиями, предъявляемыми к работам, направляемым для опубликования в открытой печати.

Несмотря на общую хорошую оценку рассматриваемой работы, к автору имеются следующие вопросы и замечания:

- 1 В разделе «Научная новизна и теоретическая значимость» п. 4 и п. 7 повторяют друг друга.
- 2 Возможность применения фото и видеосъемки для обработки изображений и определения геометрических параметров затопленных струй применялась исследователями ранее и не может являться научной новизной.
- 3 Содержание мышьяка (стр. 10) в разделе 1.1. в составах получаемых концентратов России и ближнего зарубежья указано в диапазоне от тысячных до десятых долей процента, однако на сегодняшний день содержание мышьяка достигает 2% и более.
- 4 На стр. 11 указано, что для охлаждения стен и свода печей с погружной фурой используется техническая вода, однако на практике на сегодняшний день все предприятия используют химически очищенную воду.
- 5 Описание конструкции погружной фурмы (стр. 12) не содержит информации о подаче воздуха в наружный кожух фурмы для ее охлаждения и организации дожига элементарной серы, углерода и т.п.
- 6 Преимущества агрегатов-отстойников на базе наклоняющейся печи-миксера (стр. 14) не содержат информации о значительном недостатке такого агрегата – образовании настывлей и необходимости проведения профилактических работ по ее устранению.
- 7 На стр. 22 соотношение Si:Fe и Si:Ca указано 0,88:1 и 7:1 соответственно, однако диаграмма состояния системы Al_2O_3 -CaO-FeO/SiO₂ на стр. 23 указывает, что эти соотношения соответствуют соединениям SiO₂/Fe и SiO₂/CaO.
- 8 В тексте диссертации систематически встречается внесистемная единица атм. (стр. 22, 55).
- 9 На странице 37 рассматривается вероятность протекания реакций 2.1.11-2.1.13 и 2.1.16-2.1.18 с положительным изменением свободной энергии Гиббса, что противоречит фундаментальным основам термодинамики.
- 10 Не корректная формулировка (стр. 38) процесса: «Уравнение потока в расплаве кислорода».

- 11 Таблица 2.2.1 – Состав шихты. Общее количество перерабатываемой шихты ЗАО «Карабашмедь» составляет ~ **900** тыс.т в год, однако в лит. обзоре (таблица 1.2.1) объем перерабатываемой шихты **500** тыс.т в год.
- 12 В разделе 2.2 отсутствует сводный материальный баланс.
- 13 Отсутствует ссылка на литературный источник на стр. 43.
- 14 Неточность в указании жидкости (вода), использовавшейся в качестве модели штейна (стр. 43).
- 15 В формулах 3.1.2, 3.1.3 отсутствует размерность.
- 16 Формула 3.1.2 не соответствует классическому описанию критерия Архимеда.
- 17 Необходимо уточнить (стр. 44) о вязкости какой среды идет речь.
- 18 Необходимо уточнить (стр.44) данные критерия Архимеда для практических значений действующего агрегата.
- 19 В описании лабораторной установки (рис. 3.1.2) отсутствует граница раздела жидких фаз.
- 20 Отсутствует рисунок 3.2.2 –е, ссылка на который имеется на стр. 52.
- 21 На схемах рис. 3.2.2. отсутствует ось Y.
- 22 Таблица 3.2.1 расположена на странице 61, а ссылка на нее на стр. 55.
- 23 Допущение 2 на стр. 56, касающееся отсутствия учета реакций на поверхности пузырьков газа, вносит значительную погрешность в последующие расчеты.
- 24 Применение термина «частицы железа» (стр. 58) некорректно при рассмотрении диффузии ионов железа.
- 25 В формуле 3.30 необходимо пояснить постоянный коэффициент 1,12.
- 26 На стр. 68 допущена неточность в указании заданной температуры (1600 К) – 1573 К.
- 27 На рис. 3.5.2, 3.5.3 представлены результаты фазового анализа проб штейна и шлака, однако в тексте работы об этих материалах ничего не сказано.

- 28 Необходимо уточнить диапазон соотношения кальциевого и кремнистого флюсов (стр. 84).
- 29 Необходимо уточнить минимальное достигнутое значение вязкости шлаков при изменении соотношения флюсов (стр. 84).
- 30 Рисунок 3.5.4 расположен раньше чем текстовая ссылка на него.
- 31 На рис. 3.6.1 допущена неточность по высоте уровня шлака. Конструкция миксера-отстойника не позволяет накапливать в нем расплав выше 0,4 его внутреннего диаметра.
- 32 На стр. 89 допущена опечатка при ссылке на рис. 3.5.1.
- 33 На стр. 92 допущена опечатка при ссылке на табл. 3.5.1.
- 34 На стр. 93 допущена опечатка при ссылке на рис. 3.7.2.
- 35 Блок-схема работы модели (рис. 4.3.1) не учитывает важный параметр – состав шихты по основным компонентам.
- 36 Полученные результаты исследования (критерий Архимеда, размер капель штейна, прогнозные потери меди) необходимо сравнить с литературными данными.
- 37 Разработанная модель продувки расплава в печи не учитывает тепловые процессы в расплаве.
- 38 В работе отсутствует апробация адекватности разработанной модели на базе промышленного внедрения.
- 39 Необходима оценка экономической эффективности при внедрении разработанной модели.

Заключение. Возникшие вопросы и замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы Колмачихина Б.В.

Автореферат соответствует содержанию диссертации, а публикации автора с достаточной полнотой и достоверностью передают ее основное содержание.


По новизне и актуальности полученных результатов, научно-методическому уровню и практической значимости диссертация Колмачихина Бориса Валерьевича «Исследование процессов массообмена и оптимизация работы комплекса «Печь с погружной фурмой – внешний отстойник» представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор Колмачихин Борис Валерьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.02 – «Металлургия черных цветных и редких металлов» за исследование кинетических закономерностей при описании процессов нестационарной диффузии применительно к гетерогенным реакциям в условиях подвижной границы раздела фаз для компонентов медный штейн-шлак-газовая фаза и разработку путей интенсификации и повышения извлечения меди при пирометаллургической переработке медесодержащего сырья в стационарном агрегате с верхней подачей окислительного дутья через вертикальную фурму, работающей в комплексе с печью-отстойником.

Официальный оппонент
заместитель начальника управления
стратегического планирования -
начальник отдела металлургии меди
ООО «УГМК-Холдинг»,
кандидат технических наук

14 мая 2018 года

624091, г. Верхняя Пышма,
Свердловской обл., пр. Успенский.1,
Тел. +7(34368) 9-66-82,
E-mail: v.belyaev@ugmk.com.


В.В. Беляев



Подпись Беляева В.В. заверяю

*главный специалист
управления кадров*


В.В. Беляев