

На правах рукописи



**КОЛМАЧИХИН Борис Валерьевич**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МАССООБМЕНА И  
ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ КОМПЛЕКСА «ПЕЧЬ С ПОГРУЖНОЙ  
ФУРМОЙ – ВНЕШНИЙ ОТСТОЙНИК»**

05.16.02 – Metallургия чёрных, цветных и редких металлов

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2018

Диссертация выполнена на кафедре «Металлургия цветных металлов» Института новых материалов и технологий ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель –

доктор технических наук, профессор,  
**Жуков Владимир Петрович**

Официальные оппоненты:

**Михайлов Геннадий Георгиевич**, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск, заведующий кафедрой материаловедения и физико-химии материалов;

**Беляев Вячеслав Васильевич**, кандидат технических наук, ООО «УГМК-Холдинг», г. Верхняя Пышма Свердловской обл., заместитель начальника управления стратегического планирования – начальник отдела металлургии меди

Ведущая организация –

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск

Защита диссертации состоится «08» июня 2018 г. в 15:00 ч на заседании диссертационного совета Д 212.285.05 на базе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=276507>

Автореферат разослан «\_\_» апреля 2018 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета

Сулицин Андрей Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Пирометаллургическая переработка сульфидных медных концентратов остается наиболее распространенной технологией извлечения из них ценных компонентов. Наиболее широкое применение в цветной металлургии получили автогенные процессы, использующие в качестве основного источника теплоты экзотермические реакции окисления сульфидов кислородом дутья.

Плавка в печи с погружной фурмой (TSL) является одним из вариантов аппаратурного оформления таких процессов, к преимуществам которого можно отнести простоту конструкции печи, высокую удельную производительность, малую газопроницаемость корпуса реактора, интенсивный массо- и теплообмен за счет перемешивания расплава потоками кислородо-воздушной смеси (КВС).

Для реализации данной технологии в непрерывном режиме необходимо использовать внешний агрегат-отстойник, т.к. разделение шлако-штейновой массы непосредственно в плавильном агрегате предполагает периодичность процесса и соответственно снижает его производительность.

Поиск возможных путей интенсификации плавки в цепи аппаратов плавильная печь «Аусмелт» и внешний отстойник является актуальной задачей ввиду широкого распространения агрегатов данного типа в зарубежной практике производства меди и применения на Уральских медеплавильных предприятиях (действующий комплекс ЗАО «Карабашмедь», находящийся на стадии строительства комплекс на ОАО «Святогор»).

В настоящее время физико-химические закономерности окислительных процессов, протекающих в барботируемой ванне с учетом гидродинамической обстановки в зоне продувки исследованы недостаточно полно. В частности, отсутствует информация о геометрии реакционной зоны, особенностях её движения (пульсация, вращение) в условиях продувки расплава с помощью вертикальной фурмы, оборудованной «завихрителями»; не в полной мере исследованы процессы разделения фаз в отстойнике с учетом различных дутьевых режимов в плавильной печи. Кроме того, переменный состав шихтовых материалов различных предприятий влияет на физико-химические свойства получаемых расплавов и, как следствие, на закономерности плавки, отстаивания.

В этой связи целесообразно создание модельного комплекса и проведение исследований методом холодного моделирования, что позволит оценить влияние режимов дутья на особенности гидродинамической обстановки в зоне продувки; прогнозировать во взаимосвязи величин производительности этапа плавки и стадии разделения фаз в отстойнике, общую производительность

комплекса аппаратов и оптимизировать технологические параметры плавки; с учетом полученных данных представляется возможным разработать математическую модель окислительного процесса и определить его лимитирующую стадию.

**Степень разработанности темы исследования.** Вопросы продувки ванны плавильных печей являлись предметом изучения многих отечественных и зарубежных исследователей. В работах В.И. Явойского, В.И. Баптизманского, Е.А. Капустина Б.Л. Маркова В.Б. Охотского, А.В. Гречко, Е.С. Гнатовского А.А. Гальнбека Г.С. Сборщикова, Л.М. Шалыгина, В.А. Сурина, Ю.Н. Назарова и др. рассмотрены общие закономерности и методологические подходы к изучению физико-химической механики газожидкостных систем плавильных процессов черной и цветной металлургии. Floyd J.M. и Matusiewicz D. (Ausmelt ltd., Австралия) занимались разработкой процесса плавки с погружной фурмой и являются авторами ряда работ, описывающих общие принципы процесса и историю его создания.

Однако, в настоящее время отсутствуют данные, полученные во взаимосвязи режимов продувки в агрегате с погружной вертикальной фурмой с параметрами последующего разделения фаз во внешнем отстойнике.

**Целью работы** является разработка научно обоснованного режима продувки в печи «Аусмелт», обеспечивающего повышение эффективности отстаивания и увеличение общей производительности работы системы аппаратов "печь с вертикальной фурмой-миксер".

#### **Задачи исследования:**

1. Изучение физико-химических свойств (вязкости, плотности) шлаков, получаемых в процессе плавки в печи с погружной фурмой и возможности 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.

#### **Научная новизна и теоретическая значимость работы:**

1. На основе фундаментальных законов кинетики и с учетом поверхности реагирования разработана методология математического описания процессов нестационарной диффузии применительно к гетерогенным реакциям в условиях подвижной границы раздела фаз;
2. С использованием методов холодного моделирования создана адекватная производственным данным математическая модель процесса

массопередачи через контактную поверхность: "газовая фаза-расплав", основанная на форме и динамических характеристиках погруженной струи;

3. Показано, что в условиях плавки скорость процесса окисления сульфида железа лимитируется диффузией серы из объема расплава к реакционной поверхности;

4. Проведена оценка влияния интенсивности дутья на дробление сульфидных капель расплава. Обосновано, что при работе в экстремальных режимах продувки происходит переизмельчение фазы, приводящее к значительному увеличению механических потерь меди со шлаками при отстаивании.

5. Установлено, что при использовании коаксиальной фурмы с 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.

6. Показана возможность применения фото- и видеосъемки прозрачных модельных жидкостей и соответствующих прикладных программ для обработки изображений для определения геометрических параметров затопленных струй при высоких значениях динамического критерия Архимеда;

7. Установлена взаимосвязь между дутьевым режимом в процессе плавки и последующим отстаиванием расплава в печи-миксере. Обнаружено, что экстремальные дутьевые режимы являются причиной переизмельчения сульфидных капель в расплаве, что приводит к снижению полноты разделения фаз и увеличению механических потерь меди со шлаком. Получены новые сведения о гидродинамической обстановке барботируемой ванны при продувке через вертикальную фурму с закручиванием газового потока;

8. Впервые предложена математическая модель, описывающая технологические параметры плавки во взаимосвязи с количественными характеристиками диффузионной кинетики на границе раздела «затопленная струя-расплав в агрегатах типа TSL.

### **Практическая значимость работы:**

1. Найдены предельные режимы дутья ( $Ar < 50.2$ ), при которых не происходит переизмельчения штейновой фазы и отстаивание протекает в оптимальном режиме;

2. Поскольку лимитирующей стадией плавки является массоотдача серы сульфидов к реакционной поверхности, то с целью интенсификации

процесса окисления и плавления сульфидов рекомендован ввод серусодержащего материала непосредственно в реакционную зону;

3. С учетом выявленных закономерностей диффузионной кинетики разработана общая технологическая модель плавки, позволяющая в зависимости от состава сырья, заданной производительности определять необходимый объем дутья и может быть использована в качестве элемента системы АСУТП.

4. Определен резерв в увеличении производительности плавки при сохранении плановых показателей извлечения меди в штейн.

#### **Методология и методы диссертационного исследования.**

Методологической основой работы являются исследования ведущих отечественных и зарубежных ученых, посвященные автогенным процессам и изучению продувки металлургических расплавов. Используются широко применяемые пакеты прикладных программ (MS OFFICE, STATISTICA, HSC Chemistry), физические методы исследований (вискозиметрия, электронная микроскопия, оптическая микроскопия, рентгенофазовый анализ), методы физического и математического моделирования и специализированные программы для обработки результатов ("ImageJ" и "Neuroph" для обработки фотографий, "WavePad" для обработки звуковых файлов).

#### **Положения и результаты, выносимые на защиту:**

1. Особенности гидрогазодинамической обстановки в реакционной зоне печи с погружной фурмой, полученные на холодной модели;

2. Результаты изучения образцов шлака и штейна, полученных при работе промышленного агрегата на различных дутьевых режимах;

3. Физико-химическая модель взаимодействия погруженной струи с расплавом, учитывающая обновление реакционной поверхности в режиме нестационарной диффузии.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность результатов обеспечивается их воспроизводимостью при использовании ряда независимых современных средств и методик эксперимента, аттестованных методик выполнения измерений, а также приемами математической статистики при обработке опытных данных и сопоставлением модельных и экспериментальных данных с данными реальной заводской практики.

**Апробация работы.** Результаты работы представлялись на всероссийских и международных конференциях, в том числе: III международной интерактивной научно-практической конференции «Инновации в материаловедении и металлургии», (г. Екатеринбург, 2013 г.); XII всероссийской научной конференции «Бакунинские чтения», (г. Екатеринбург, 2014 г.), международном совещании «Современные процессы

комплексной и глубокой переработки труднообогатимого минерального сырья» Плаксинские чтения – 2015, (г. Иркутск, 2015 г.), международной конференции «Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья» Плаксинские чтения 2017 (г. Красноярск., 2017 г.)

**Личный вклад соискателя:** Теоретическое обоснование, формирование цели и направлений исследований, непосредственное участие в них, анализ и обобщение полученных результатов, сопоставление их с производственными данными, подготовка научных публикаций, представление результатов на конференциях, оценка эффективности предложенных решений и формирование предложений по изменению технологического режима.

### **Публикации**

По теме диссертационной работы опубликовано 9 научных работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа изложена на 109 страницах машинописного текста, включает 40 рисунков, 16 таблиц и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 72 источников отечественных и зарубежных авторов.

*Автор выражает благодарность научному руководителю доктору технических наук, профессору Жукову Владимиру Петровичу, кандидату технических наук, доценту Агееву Никифору Георгиевичу, ведущему инженеру кафедры МЦМ Меньщикову Викентию Алексеевичу, коллективу кафедры «МЦМ» УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, специалистам металлургического цеха ЗАО «Карабаимедь» и руководству предприятия за помощь в работе над диссертацией.*

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во *введении* обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту, сформулированы научная новизна, научное и практическое значение работы.

В *первой главе* выполнен 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 механическими ее 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.

**Вторая глава** посвящена анализу физико-химических свойств и параметров процесса. На основе литературных данных составлен перечень основных реакций. Для них с использованием пакета программ HSC Chemistry был проведен расчет основных термодинамических параметров их протекания.

С учетом выявленной последовательности химических превращений, реального состава исходных шихтовых материалов был выполнен расчет материального и теплового балансов процесса.

Для формирования исходных данных об объемах и соотношениях шлака и штейна с целью дальнейшего физического моделирования рассчитан материальный баланс. При этом учитывали, что на переработку поступают концентраты с четырех разных месторождений, подбор отношений которых в составе шихты является одним из требований к создаваемой модели процесса.

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

В качестве модельных жидкостей для предварительных опытов избраны техническое масло и водный раствор хлористого натрия. При выборе жидкостей основным критерием было соответствие отношения плотностей между модельными жидкостями и в реальной системе, т.е.

$$(\rho_{\text{шл}}/\rho_{\text{шт}})\text{-idem}, \quad (1)$$

где:  $\rho_{\text{шл}}$ ,  $\rho_{\text{шт}}$  - соответственно плотность шлака и штейна, кг/м<sup>3</sup>.

Для соблюдения данного соотношения в воде растворяли NaCl до предела растворимости, получая в результате раствор плотностью 1197 кг/м<sup>3</sup>.

Параметры дутьевого режима подбирали, основываясь на расчете критериев подобия: критерия Рейнольдса и Архимеда. Расчет выполнялся с учетом данных о работе реального агрегата, включавших такие параметры, как расход дутья, давление на входе в фурму, состав шлака и штейна, а также соответствующие производственному составу физические параметры. Для определения величины критерия Архимеда, использовали уравнение, где диаметр фурмы являлся характеристикой линейного размера:

$$Ar = (w^2 \cdot \rho_{\text{г}}) / (d \cdot g \cdot \rho_{\text{ж}}), \quad (2)$$

где  $w$  – скорость газового потока,  $\rho_{\text{г}}$  – плотность газа,  $d$  – диаметр фурмы,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкой фазы.

Гидродинамические свойства потока оценивали на основе критерия Рейнольдса по формуле

$$Re = \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\mu}, \quad (3)$$



где  $v$  – скорость потока,  $D$  – диаметр фурмы,  $\rho$  – плотность воздуха,  $\mu$  – вязкость среды

Диаметр фурмы составлял 0.005 м, кинематическая вязкость среды была равна  $1.34 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Полученные значения использовали для сопоставления с данными практики реального агрегата с погружной фурмой с целью подтверждения корректности выбранных режимов и условий моделирования. Допускали отклонение критерия Рейнольдса в пределах 15% при полном совпадении критерия Архимеда. Сопоставление показало, что диапазон дутья 0.0018 - 0.0027  $\text{ м}^3/\text{с}$  на модельной установке соответствует встречающимся на практике режимам работы агрегатов TSL.

Общий вид модели и принципиальная схема установки представлены на рисунках 1 и 2.



Рисунок 1 – Общий вид модели

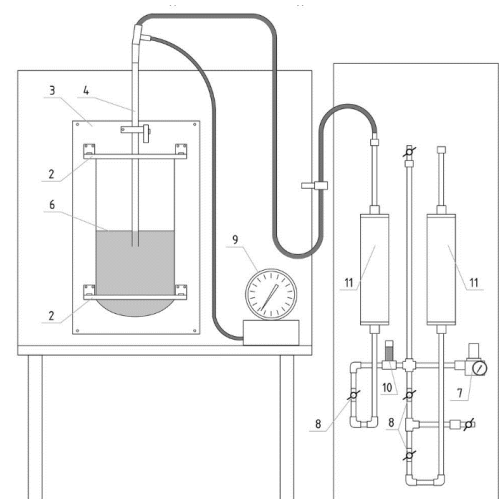


Рисунок 2 – Принципиальная схема модели

1 - колба, 2 - бандаж, 3 - подвижная основа, 4 - фурма, 5 - ролики, 6 - модельная жидкость, 7 - редуктор, 8 - кран, 9 - манометр, 10 - аварийный клапан, 11 – ротаметр.

Для улучшения качества получаемых изображений применялась дополнительная равномерная подсветка модельной установки встроенными в стенд галогеновыми лампами.

Два градуированных ротаметра использовались для фиксации объема дутья, проходящего через внешнюю и внутреннюю части фурмы. Система редукторов обеспечивала возможность дополнительного регулирования интенсивности продувки. Давление на входе в фурму фиксировалось при помощи аналогового манометра, подключенного через гибкий шланг в тройник у входа в фурму.

В качестве источника дутья выбран компрессор производительностью до 300  $\text{ дм}^3/\text{мин}$  с возможностью регулировки объема дутья, согласно поставленной задаче моделирования.

Эксперименты по холодному моделированию фиксировали при помощи видеосъемки с частотой 60 и 100 к/с и фотосъемки частотой 10 к/с на цифровые камеры SONY NEX-5 и SONY CYBERSHOT RX100. Фотографии снимали без сжатия для сохранения исходного качества (RAW) и обрабатывали при помощи специализированного программного обеспечения.

Каждый опыт в серии фиксировался трижды: три серии по 10 кадров в случае с фотографической фиксацией либо три отрезка видео по 60 секунд в случае с видеofиксацией. Разрешение фотографий составляло 4592x3056 точек. Видеозапись велась с разрешением 1920x1080 точек.

Пример полученной серии снимков, полученных в результате опытов, приведены на рисунке 3.

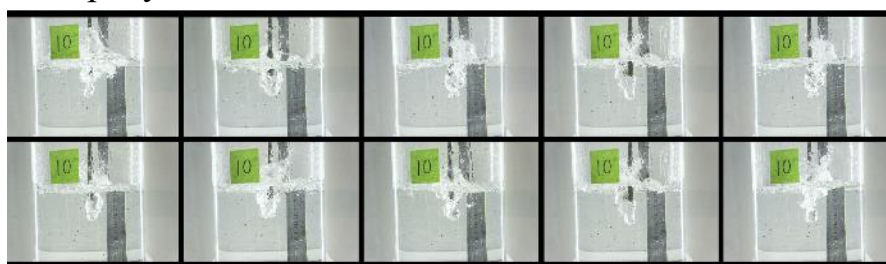


Рисунок 3 – Серия из 10 снимков, сделанных при расходе воздуха  $2.31 \text{ м}^3/\text{ч}$  с заглублением фурмы 12 мм.

Анализ фотографий показал, что при продувке через фурму с завихрителем формируется стабильная фигура вращения при интенсивностях до  $8.14 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Серии снимков обрабатывали в графическом редакторе с наложением кадров друг на друга и последующим наложением координатной сетки. Использовали снимки, полученные с заглублением фурмы, соответствующим образцу.

Результаты опытов по изучению частоты пульсации факела дутья фиксировали при помощи аналогового мембранного микрофона, установленного в объемном корпусе, врезанном в верхнюю часть фурмы.

Запись звука производилась в режиме моно через цифровой вход звуковой карты Realtek AC97.

Полученные записи обрабатывали с помощью быстрого Фурье-преобразования, осуществлявшегося средствами приложения WavePad, зачищались от фоновых шумов. При анализе полученных разверток использовались методы, основанные на работах. Вычисленные на основе записи звука частоты пульсации сопоставляли с визуально наблюдаемым движением факела на фото- и видеозаписях.

Отклонения результатов составили не более 1 пульсации на 10 секунд, что свидетельствует о высокой сходимости методов визуального- и аудиоанализа и их применимости к выбранному объекту.

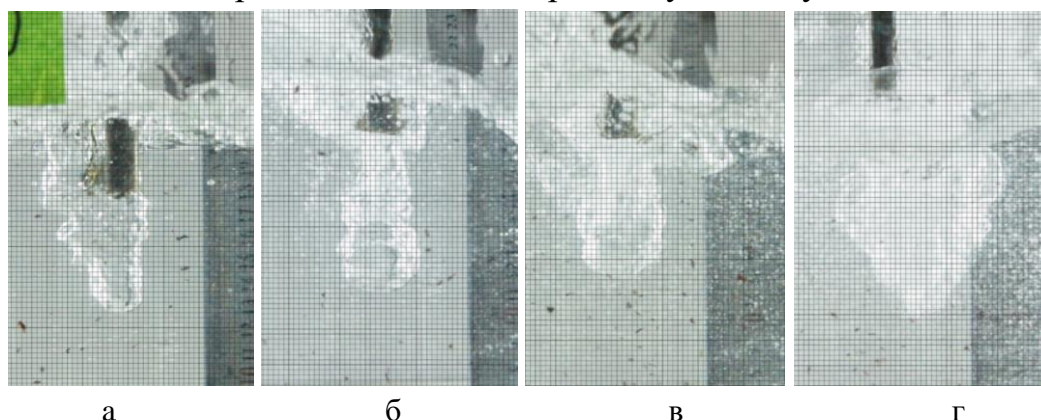


Рисунок 4 – Геометрическая форма и размеры затопленной струи при критериях Архимеда: 10.0 (а); 26.3 (б); 50.2 (в); 94.0 (г)

В дальнейшем данные рисунка б использовали для построения условных контуров струи, представляя ее форму как элементы цилиндра и поверхностей вращения симметричных кривых относительно вертикальных осей. На рисунках 5, а-е показана конфигурация реакционной зоны, внешняя поверхность которой складывается из поверхности вращения кривой *ab* относительно оси *Y* и усеченного цилиндра, обозначаемого траекторией *cdeb*, для удобства количественной интерпретации дополнительно помещена координатная сетка. При расчете размеров РЗ на модели учитывали коэффициент оптического увеличения.

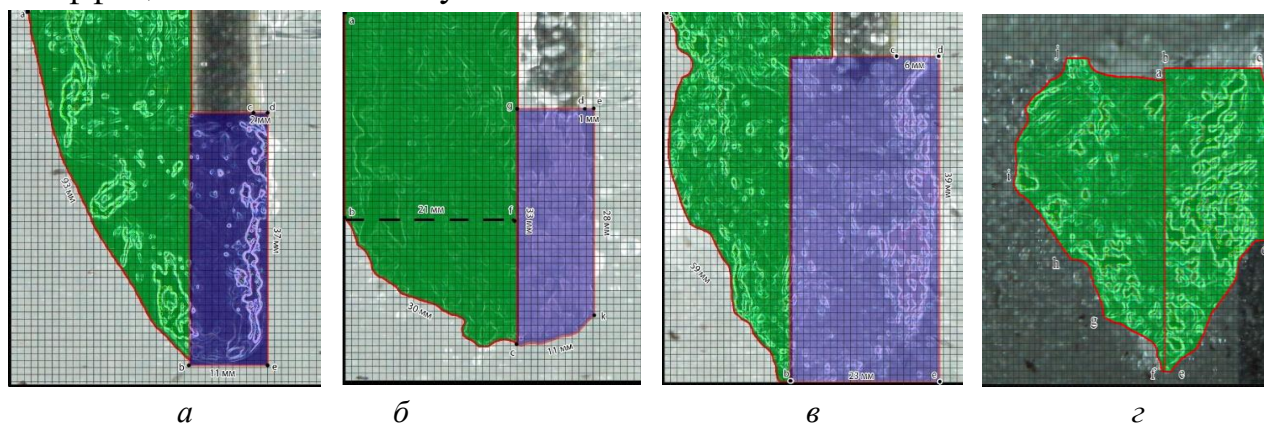


Рисунок 5 – Схемы реакционных зон к расчету контактной поверхности в зависимости от критерия Архимеда:  $Ar=10,0$  (а);  $Ar=26,3$  (б);  $Ar=50,2$  (в);  $Ar=94,0$  (г).

Поверхность участков, полученных вращением кривых *ab* (рисунок 5 а); *bc* и *ck* (рисунок 5 б); *ab* (рисунок 5 в); *ai*, *ib*, *bk* (рисунок 5 г) относительно соответствующих вертикальных осей рассматривали как поверхность тел вращения, боковую площадь которых определяли по уравнению

$$S_1 = 2\pi \int_m^n f(Y) \cdot \sqrt{1 + [f'(Y)]^2} dY, \quad (4)$$

где:  $f(Y)$ —функция кривых вращения, имеющая соответственно обозначениям и координатам, принятыми на рисунке 5 ( $a-z$ ),  $m$  и  $n$  – пределы интегрирования, численно равные конечным координатам точек фигур вращения.

Реакционную поверхность различных участков цилиндрической части воронки  $S_2$  рассчитывали по общеизвестным из элементарной геометрии соотношениям. Тогда, полная поверхность по результатам холодного моделирования составляет  $S=S_1+S_2$ .

Расчет пределов интегрирования и соответственно поверхности  $S_T$  осуществляли с учетом теплового расширения реакционной зоны (РЗ) при средней температуре расплава 1300 °С.

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

В модели приняты следующие допущения:

1. Рассматривается только один цикл, связанный с образованием расплава из единичной массы загрузки, а при непрерывной ее дальнейшей подаче, предполагается аддитивная совокупность циклов;

2. Физико-химические процессы окисления сульфидов протекают на поверхности контакта фаз «струя-расплав», а роль пузырьков газа, образующихся после распада струи, образования  $SO_2$  заключается в перемешивании жидкой фазы и выравниванию концентрации реагентов в объеме расплава;

3. Продолжительность существования единичной поверхности  $S_{1(T)вращ}$ , контакта струи с расплавом при ее вращении и время ее обновления соответствует одному обороту  $\tau_1$ , а образования за счет пульсации  $\tau_2$ , площадью  $S_{1(T)пульс}$  за одну фазу перемещения воронки по вертикали.

Полная внешняя поверхность вращения воронки с учетом температурного ее расширения равна

$$S_{T(\text{вращ})} = S_{1(T)\text{вращ}} + S_{2(T)}. \quad (5)$$

Аналогично рассчитывали поверхность затопленной струи в процессе ее пульсации вдоль оси Y, при этом из полученных данных вычитали площадь основания цилиндра, полагая, что данный участок не участвует в процессе массоотдачи, т.к. здесь отсутствует ее обтекание расплавом и происходит «останов» потока. В этом случае поверхность пульсирующей струи составляет

$$S_{(T)\text{пульс}} = S_{1(T)\text{пульс}} + S_{2(T)} - S_{2(T)\text{осн.}}, \quad (6)$$

а полная поверхность контакта принята как сумма величин  $S_{T(\text{вращ})}$  и  $S_{(T)\text{пульс}}$

4. В любой момент времени на поверхности струи существует слой жидкой пленки шлако-штейнового расплава, с внутренней поверхности которой вязкое течение отсутствует, а с внешней - контактирует со свежими элементами расплава;

5. Процесс десульфуризации происходит по брутто-реакции:



что предполагает также протекание взаимодействий



С учетом электрохимической природы расплавов процессы массоотдачи рассматривается исходя из диффузии частиц железа в форме  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ , серы ( $\text{S}^{2-}$ ) и в газовой фазе молекулярного кислорода  $\{\text{O}_2\}$ , при соответствующих значения коэффициентов диффузии;

6. Пренебрегаем исчезающее малой равновесной концентрацией реагента на контактной границе, и скорость процесса принимаем пропорционально объемной.

7. Скорость массоотдачи отдельных реагентов в расплаве и в газовой фазе описывается законом нестационарной диффузии и в общем случае подчиняется уравнению

$$\frac{dM_{j(p),j(z.\phi)}}{dt} = \sqrt{\frac{D_{j(p),j(z.\phi)}}{\pi\tau}} S \frac{m_{j(p)^V, j(z.\phi)^V}}{V}, \quad (10)$$

где  $M_{j(p),j(z.\phi)}$  - масса  $j$ -ого реагента, диффундирующего из объема расплава или газовой фазы к реакционной поверхности, кг;

$m_{j(p)^V, j(z.\phi)^V}$  - масса  $j$  реагента в объеме расплава, газовой фазе, кг;

$D_{j(p),j(z.\phi)}$  - коэффициент диффузии  $j$  реагента,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$S$  - поверхность контакта, равная  $S_{T(\text{вращ})}$ ,  $S_{(T)\text{пульс}}$ ,  $\text{м}^2$

$\tau$ - время существования поверхности с площадью  $S_{T(\text{вращ})}$ ,  $S_{T(\text{пульс})}$  численно равное  $\tau_1$  и  $\tau_2$ , соответственно;

$V$ -объем расплава в плавильной печи,  $\text{м}^3$ , принимаемый равным объему цилиндра

$$V = \pi R^2 h_p, \quad (11)$$

где:  $R$ - радиус печи, м;  $h_p$ - высота расплава в печи, м;

8. Газ в струе нагревается мгновенно до температуры расплава, которая равна температуре реакционной поверхности.

Рассматривали следующие возможные стадии процесса.

*Массоотдача кислорода из струи газа к поверхности контакта фаз.* Полагая, что основное сопротивление массоотдачи сосредоточено в пограничном слое, примыкающем к контактной поверхности со стороны газовой фазы и пренебрегая ничтожно малой равновесной концентрацией, для количественной оценки массы переносимого кислорода использовали интегральное уравнение

$$m_{\{O_2\}} = 1.12 \sqrt{D_{\{O_2\}} \tau} S C_{\{O_2\}}^V, \quad (12)$$

где:  $C_{\{O_2\}}^V$  - концентрация кислорода в дутье при его обогащении 40 % об.

$D_{\{O_2\}}$ -коэффициент диффузии кислорода принятый с учетом реальной температуры (1600К), избыточного давления газов (0,15 МПа).

Число фаз обновления поверхности за 3600 с в результате вращения и пульсации воронки составляет

$$N_1 = 3600 / \tau_1, \quad (13)$$

$$N_2 = 3600 / \tau_2, \quad (14)$$

а общая масса кислорода  $m_{\{O_2\} \text{общ}}$ , участвующего в процессе диффузии, и

количество окислившейся за 3600 с. серы, оценивали по уравнениям

$$m_{\{O_2\} \text{общ}} = 1.12 \cdot C_{\{O_2\}}^V (N_1 \cdot \sqrt{D_{\{O_2\}} \tau_1} S_{(T)\text{вращ.}} + N_2 \cdot \sqrt{D_{\{O_2\}} \tau_2} S_{(T)\text{пульс.}}) \quad (15)$$

$$M_S^{\text{расч}} = m_{(S)_o} - 1.5 m_{\{O_2\} \text{общ}}. \quad (16)$$

Величину  $M_S^{\text{практ.}}$  определяли на основании практических данных работы комплекса на ЗАО «КМК» по достигнутой степени десульфуризации расплава с учетом выделения диссоциативной серы.

*Массоотдача серы в расплаве.* В этом случае интегральная форма уравнения 10 имеет вид

$$M_S = 1.12 \sqrt{D_S \tau} S \frac{m_{(S)}^V}{V}, \quad (17)$$

где  $M_S$  -масса серы, перенесенной в шлаке к поверхности струи, кг;

$D_S$  -коэффициент диффузии серы в объеме шлакового расплава,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$m_{(S)}^v$  - масса серы в глубине ванны, принятая по данным производственной модели, равная ее количеству в шихте за вычетом диссоциативной серы, кг.

$V$ -объем расплава в плавильной печи,  $10.6 \text{ м}^3$ .

Поскольку в автогенных технологиях процессы плавления и окисления сульфидных концентратов практически совпадают по времени то взаимодействия 7-9, происходящие в процессе расплавления шихты не учитывали и начальную концентрацию серы в расплаве считали постоянной.

Принимая расчетное для анализа время 300 с и разбивая его на 10 шагов ( $n$ ) с продолжительностью каждого шага  $\Delta\tau=30$  с, выражения для расчета серы, переведенной в газовую фазу за 3600 с. составляет

$$\Delta m_{\{S\}} = \sum_{i=1}^{12} \Delta m_{\{S\}_i}, \quad (18)$$

где:  $\Delta m_{\{S\}_i}$  -масса серы переведенной в газовую фазу за 300 с,

а текущей и остаточной массы серы в расплаве за каждый  $i$  шаг после предыдущего шага  $i-1$  при вращении и пульсации струи по уравнению

$$M_S^{расч} = m_{S_0} - \Delta m_{\{S\}_i} = m_{S_0} - \left( \sum_{i=1}^n N_1 \cdot 1,12 \sqrt{D_S \tau_1} S_{T(вращ)} \cdot \frac{m_{\{S\}_{i-1}}}{V} + \right. \\ \left. + \sum_{i=1}^n N_2 \cdot 1,12 \sqrt{D_{(S)} \tau_2} S_{T(пульс)} \cdot \frac{m_{\{S\}_{i-1}}}{V} \right), \quad (19)$$

где:  $N_1, N_2$ - число обновления фаз за 30 с.

Для первого шага ( $i=1$ ) в качестве величины  $m_{(S)}^v$  избирали массу исходной серы  $m_{S_0}$

Величину коэффициента диффузии  $S^2$  рассчитывали согласно литературным данным по уравнению

$$D_{S^2} = 2.33 \cdot 10^{-4} \exp(-5220/RT) = 2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}, \quad (20)$$

при температуре 1600 К.

*Массоотдача железа в расплаве.*

Массоотдача железа в расплаве к реакционной поверхности протекает с участием катионов железа  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ , и расчетное уравнение в общем виде имеет вид:

$$\Delta m_{\text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}} = 1,12 \cdot \frac{m_{(\text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+})}}{V} \cdot [N_1 \cdot \sqrt{D_{(\text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+})} \tau_1} S_{T(вращ)} + N_2 \cdot \sqrt{D_{(\text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+})} \tau_2} S_{T(пульс)}] \quad (21).$$

Предположим, что скорость процесса лимитируется внешней диффузией частиц  $\text{Fe}^{2+}$ . В этом случае за 300 с масса, участвующих в процессе массоотдачи частиц  $\text{Fe}^{2+}$  за  $i$  шаг с разбивкой  $n=10$  определяется как

$$M_{(Fe^{2+})t,300c.} = \sum_{i=1}^{10} \Delta m_{Fe^{2+}}, \quad (22)$$

и соответствующее количество удаляемой серы за 3600 с составит

$$M_{(S)t,3600c.} = 12M_{(Fe^{2+})t,300c.} \cdot 32/56. \quad (23)$$

Масса образующегося FeO в расплаве в форме катиона  $Fe^{2+}$  за  $i$  шаг рассчитана по уравнению

$$M_{(Fe^{2+})_i} = \Delta m_{(S)_i} \cdot 56/32, \quad (24)$$

где:  $\Delta m_{(S)_i}$  - масса переносимой серы из формулы (19), тогда концентрация  $Fe^{2+}$  по мере его накопления в расплаве за каждый шаг составит  $M_{(Fe^{2+})_{i+1}}$ , а изменение объемной концентрации  $M_{(Fe^{2+})_{i+1}}/V$ .

Остаточную концентрацию серы в расплаве рассчитывали по формуле

$$M_S^{расч} = m_{(S)_0} - M_{(S)t,3600c.} \quad (25)$$

Коэффициенты диффузии  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  (1600 К) определяли с использованием литературных данных по уравнению

$$D_{Fe^{2+}} = 1.26 \cdot 10^{-4} \exp(-3260/RT) = 9.86 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}, \quad (26)$$

и для  $Fe^{3+}$  экстраполяцией известных экспериментальных величин ( $D_{Fe^{2+}} = 1.3 \cdot 10^{-9}$ )  $\text{м}^2/\text{с}$ .

При анализе диффузионных затруднений со стороны массоотдачи катионов  $Fe^{3+}$  учитывали протекание реакции 8 и массу частиц  $Fe^{3+}$ , находили на основе известного отношения  $Fe^{3+}/Fe^{2+} = 1.3-1.6$ , принимая среднее значение 1.45.

Общее количество переведенной в газовую фазу серы рассчитывали по уравнениям

$$M_{(Fe^{3+})t,300c.} = \sum_{i=1}^{10} 1,45 \cdot \Delta m_{Fe^{3+}}, \quad (27)$$

$$M_{(S)t,3600c.} = 12M_{(Fe^{3+})t,300c.} \cdot 32/348, \quad (28)$$

а  $M_S^{расч}$  по формуле (25).

*Химическая реакция.* Принимаем, что окисление сульфида железа протекает по брутто-реакции (7). Для количественной оценки скорости реакции в этом режиме использовали известные результаты исследований кинетики окисления тонкого слоя расплавленного сульфида железа с высокой линейной скоростью дутья, исключая внешнедиффузионные затруднения. В этом случае зависимость максимальной скорости ( $v_{max}$ ,  $\text{мг}/(\text{с} \cdot \text{см}^2)$ ) окисления жидкого сульфида железа при расходе описывается уравнением

$$v_{max} = 0,43 + 0,81q - 0,001 C_{O_2} + 0,017q \cdot C_{O_2}, \quad (29)$$



а масса удаляемой серы в этом случае может быть определена по формуле

$$\Delta m_{\{S\}(t, 3600s)} = v_{\max} \cdot \Sigma F_{T/32/88}. \quad (30)$$

Результаты расчетов по уравнению (30) для минимального расхода дутья  $q$  и содержания кислорода 40 % об. показали, что величины расчетного и экспериментального количества удаляемой серы даже при  $Ar=10.0$  на порядки отличаются друг от друга ( $9.6 \cdot 10^5$  и  $4,6 \cdot 10^3$  кг, соответственно) и превосходят начальную массу серы. Поэтому процесс окисления маловероятно протекает в кинетической области.

Таблица 1 – Результаты математического моделирования

Величина	Число Архимеда			
	10,0	26,3	50,2	94,0
<i>Диффузия кислорода в газовой фазе</i>				
$M_S^{\text{расч}}$ , кг	144	989	7917	$16,9 \cdot 10^6$
<i>Диффузия <math>S^{2-}</math> в расплаве</i>				
$M_S^{\text{расч}}$ , кг за 1 ч	124	867	5267	674 за 1 с
<i>Диффузия <math>Fe^{2+}</math></i>				
$M_S^{\text{расч}}$ , кг за 1 ч	0,86	41,68	2323	3155 за 1 с
<i>Диффузия <math>Fe^{3+}</math></i>				
$M_S^{\text{расч}}$ , кг за 1 ч	0,07	3,53	196	267 за 1 с
$M_S^{\text{практ.}}$ , кг за 1 ч	4,60	4930	5150	5270

Анализ данных табл.1. 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. Причем, начиная с этой величины расчетное значение, становится больше практического, в отличие от режима диффузии в газовой фазе, где во всем интервале величин  $Ar$  расчетные значения выше экспериментальных.

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 ( $Ar=94$ ) и 7010, 30303, соответственно. Данные обстоятельства могут свидетельствовать о турбулентном движении 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 РЗ и соответственно траектории движения частицы.

В дальнейшем были проведены опыты для оценки зависимости режима отстаивания от параметров продувки расплава. Процесс дробления, объединения и оседания полученных капель фиксировался на видео. Результаты опытов по изучению процесса отстаивания были обработаны посредством пакетов MS EXCEL и STATSOFT 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 модели, 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 расчетной формулы формулу Стокса.

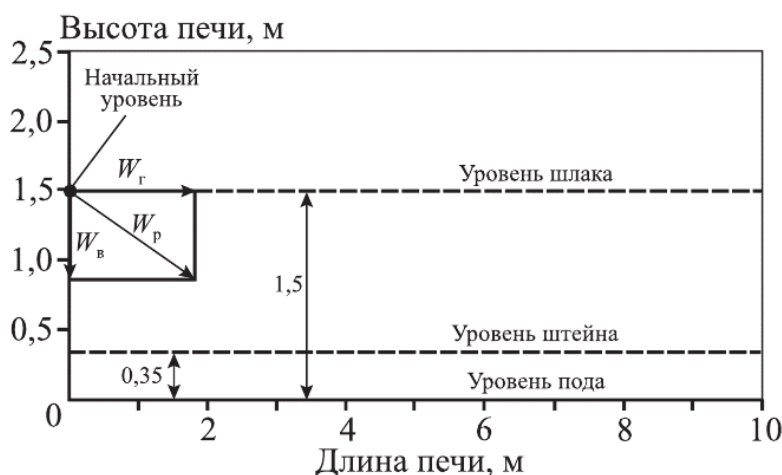


Рисунок 6 – Схема модели отстаивания расплава в печи-отстойнике

$w_v$ ,  $w_h$  – вертикальная и горизонтальная составляющие скорости, м/с;  $w_p$  – результирующая скорость, м/с. Вертикальная скорость была рассчитана по формуле:

$$w_v = (1/18\mu)gd^2(\rho_2 - \rho_1), \quad (31)$$

где  $\mu$  – вязкость шлака;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\rho_2 - \rho_1$  – разность плотностей штейна и шлака;  $d$  – диаметр частицы.

Горизонтальная составляющая скорости  $w_r$  может быть рассчитана по формуле

$$w_r = V_m/F, \quad (32)$$

где  $V_m$  – это объем массы, поступающий в отстойник за единицу времени,  $m^3/c$ ;  $F$  – площадь сечения печи,  $m^2$ .

Полученные результаты указывают, что при продувке с малым заглублением фурмы даже экстремальный режим дутья (130% от реального,  $Ar > 50.8$ ) 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  $Ar$ .

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.



Рисунок 7 – Пример обработанных снимков из серии, использовавшихся при анализе процесса оседания капель

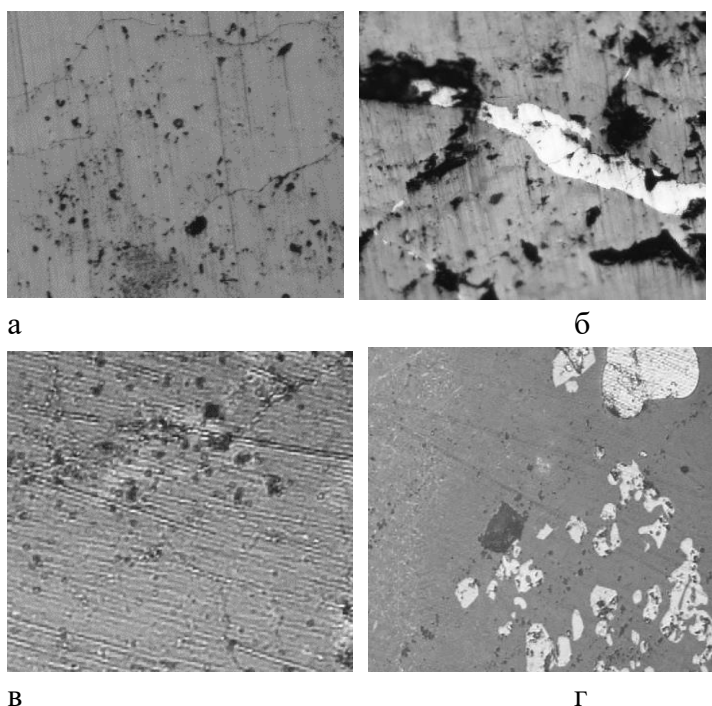
Фотографии процесса оседания капель более плотной фазы сквозь слой менее плотной обрабатывались при помощи свободно распространяемого программного пакета ImageJ, разработанного специалистами Национального института здоровья США. В результате обработки были получены серии кадров высокой контрастности, на которых четко выделены отдельные частицы. Средствами пакета был проведен анализ изображения с получением данных о количестве частиц различной площади при различных условиях продувки и влиянии интенсивности на дробление капель тяжелой фазы.

Установлено, что при перемешивании с интенсивностью продувки менее чем  $Ar = 50$  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 реальном предприятии (соответствующих  $Ar$  50.2 и  $Ar$  63.0), которые были подвергнуты рентгено-флюоресцентному анализу и рассмотрены с использованием цифрового микроскопа с 300-кратным увеличением.

Полученные снимки представлены на рисунке 8



а, б – шлак и штейн при  $Ar$  50  
в, г – шлак и штейн при  $Ar$  63

Рисунок 8 – Микрофотографии шлака и штейна при  $Ar$  50.2 и  $Ar$  63

Полученные микрофотографии шлака были обработаны с использованием пакета ImageJ для определения крупности частиц. Результаты обработки представлены на рисунке 9. Программа позволяет определить количество объектов и их величину в пикселях и, зная масштаб изображения, эти данные можно использовать для определения крупности частиц.

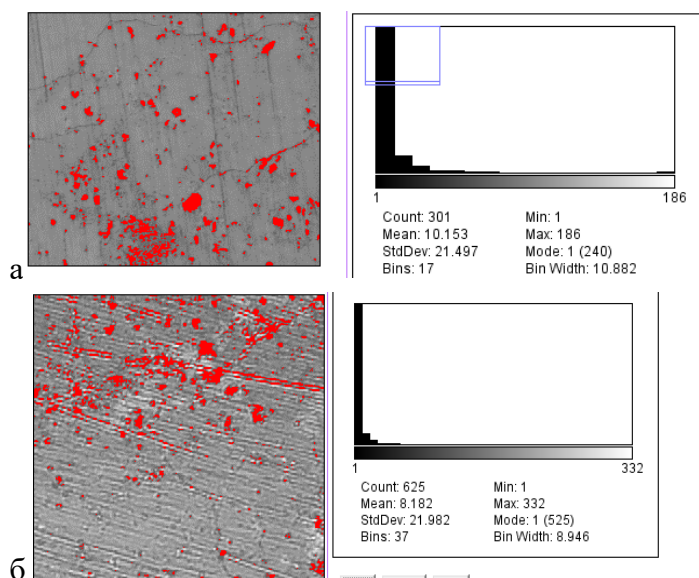


Рисунок 9 – Обработанные микрофотографии шлака а) при Ar 50.2 и б) при Ar 63.0.

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 рассматривается 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 следующие предельные параметры работы системы агрегатов с переработкой концентрата материалов состава, указанного в главе 2:

*Плавильная печь*

Производительность по твердым материалам, СМТ, т/ч.....	155.2
Загрузка, т/ч	
SiO <sub>2</sub> .....	13
CaO.....	2.9
Оборотные материалы.....	14.23
Расход технологического дутья, (КВС), м <sup>3</sup> /ч.....	51700
Содержание кислорода в КВС, % об.....	52.224
Выход расплава в отстойник, т/ч.....	123.23

*Миксер*

Производительность, т/ч

по штейну.....	42.25
по шлаку.....	80.98
Содержание меди, % (по массе)	
в штейне.....	48
в шлаке.....	2.5
Извлечение меди в штейн, % .....	91

Данные параметры являются оптимальными и получены во взаимосвязи работы плавильной печи и отстойника. 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% и коэффициент извлечения меди снижается до величины 87% .

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Полученные в работе результаты исследований и построенные модели свидетельствуют о сложности процессов массообмена, протекающих при плавке сульфидных медных концентратов в агрегатах с погружной фурмой. В данной работе предпринята попытка применения методик математического и физического моделирования для изучения этого процесса и формирования методики подбора оптимальных дутьевых режимов с учетом их влияния на последующую стадию отстаивания расплава во внешнем агрегате.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Подтверждено, что перемешивание расплава дутьем через коаксиальную фурму с завихрителями происходит за счет пульсирующего движения факела в вертикальной плоскости и вращательного движения тела вращения вокруг оси фурмы в горизонтальной плоскости. В экстремальных режимах стабильная поверхность вращения не формируется, наблюдается повышенное разбрызгивание расплава и переизмельчение сульфидных капель.

2. Найдено, что оптимальным с точки зрения перемешивания ванны при отсутствии чрезмерного дробления частиц штейна является значение критерия Архимеда до 50.2 (соответствует объему дутья в 51 700 м<sup>3</sup>/ч в случае с реальным агрегатом). Эта величина может использоваться при определении оптимального дутьевого режима и подборе соотношений параметров «объем дутья – диаметр фурмы – степень обогащения дутья».

3. Показано, что большое влияние на ход процесса оказывает степень заглубления фурмы. Так, увеличение заглубления на 25% позволило получить сопоставимые результаты с точки зрения перемешивания массы при объеме дутья на треть меньшем, чем при реально используемом заглублении. Вместе с тем уменьшение заглубления приводит к невозможности эффективно перемешать расплав даже с использованием экстремальных режимов продувки. Однако опыт зарубежных предприятий показывает, что увеличение заглубления сказывается на

кампании фурмы в сторону уменьшения, что ограничивает возможность интенсификации процесса этим способом.

4. Предложена математическая модель процесса, сочетающая в себе расчеты теплового и материального балансов с моделью массообмена, позволяющая оценить окислительную способность дутья и степень использования кислорода.

5. Обосновано, что диффузия кислорода не является лимитирующей для процесса окисления сульфидов, а скорость десульфуризации расплава вероятней всего, контролируется массоотдачей серы в объеме расплава. Это позволяет рекомендовать для интенсификации процесса ввод шихтовых материалов непосредственно в реакционную зону. Одним из вариантов является подача высушенного тонкоизмельченного концентрата через центральную трубу фурмы инъекцией. Непосредственный ввод в реакционную зону мелкодисперсного материала наряду с развитием контактной поверхности создает предпосылки не только для интенсификации процессов десульфуризации, но и повышает величину удельного тепловыделения и усвоение теплоты экзотермических реакций в зоне погруженного факела.

#### **Перспективы дальнейшей разработки темы исследования:**

1. Исследование влияния геометрической формы и положения завихрителей в фурме на формируемый факел дутья.

2. Получение данных о гидродинамической обстановке в расплаве и закономерностях диффузионной кинетики для полуавтогенного режим плавки с участием природного газа или твердого углеродсодержащего топлива.

#### **Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

*Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определённых ВАК:*

1. Колмачихин Б.В. Исследование гидрогазодинамических процессов в системе аппаратов «Реактор TSL – отстойник» методами холодного моделирования / Б.В. Колмачихин, В.П. Жуков // *Металлург.* – 2013. – № 4. – С. 37-40 (0,2 п.л. / 0,1 п.л.).

2. Колмачихин Б.В. Моделирование и возможные пути совершенствования процесса оттаивания расплава после плавки в печи с погружной фурмой / Б.В. Колмачихин, В.П. Жуков // *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия.* – 2015. – Спецвыпуск. – С. 8-11 (0,31 п.л./0,15 п.л.).

3. Колмачихин Б.В. Влияние параметров дутьевого режима на гидродинамику процесса плавки с погружной фурмой / Б.В. Колмачихин, В.П. Жуков, В.А. Меньщиков // *Металлург.* – 2015. - №8. – С. 79-81 (0.2 п.л. / 0.1 п.л.).

4. Колмачихин Б.В. Study of Hydrodynamics of a Trof Converter by Numerical and Cold Modeling / V.A. Men'shchikov, N.G. Ageev, B.V. Kolmachikhin // *Metallurgist.* – 2016. - №60. – С.212-216 (0.2 п.л. / 0.06 п.л.)

#### **Тезисы докладов и материалы конференций:**

5. Колмачихин Б.В. Изучение гидродинамических особенностей агрегатов с погружной фурмой методом холодного моделирования / Б.В. Колмачихин, В.П. Жуков // *Инновации в материаловедении и металлургии. Материалы III*

- Международной интерактивной научно-практической конференции. – Екатеринбург: УрФУ, 2013. – С. 51-53 (0,11 п.л. / 0,05 п.л.).
6. Колмачихин Б.В. Применение холодного моделирования для изучения процессов в системе аппаратов "Реактор TSL-отстойник" / Б.В. Колмачихин, В.П. Жуков // Создание высокоэффективных производств на предприятиях горно-металлургического комплекса. Материалы международной научно-практической конференции. – В. Пышма: Уральский рабочий, 2013. – С. 140-141. (0,12 п.л. / 0,06 п.л.).
7. Колмачихин Б.В. Повышение эффективности отстаивания расплава в печах-отстойниках после плавки в агрегатах с погружной фурмой / Б.В. Колмачихин, В.П. Жуков // Прогрессивные методы обогащения и комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья. Плаксинские чтения, 2014. – Алматы, ТОО «Арко», Караганда, 2014. - С. 496-497 (0,11 п.л. / 0,05 п.л.).
8. Колмачихин Б.В. Изучение гидродинамики пирометаллургических агрегатов методом холодного моделирования / Б.В. Колмачихин, В.П. Жуков, В.А. Меньщиков // Международное совещание «Современные процессы комплексной и глубокой переработки труднообогатимого минерального сырья» (Плаксинские чтения 2015). – Иркутск, Полиграфический центр «РИЭЛ», 2015. – С. 392-393 (0,1 п.л. / 0,04 п.л.).
9. Колмачихин Б.В. Изучение процесса отстаивания расплава методами физического моделирования / Б.В. Колмачихин, Н.М. Ипатов, А.В. Бусова, Д.А. Кунщиков // Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плаксинские чтения 2017). – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017. – С. 343-344 (0,1 п.л. / 0,03 п.л.).