

На правах рукописи



**МЕНЬЩИКОВ Викентий Алексеевич**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ  
МЕДЬСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ В ТРОФ-КОНВЕРТЕРЕ**

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 –** кандидат технических наук, доцент,  
**АГЕЕВ Никифор Георгиевич**

**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;

**КОНОВАЛОВ Георгий Владимирович**, кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», доцент кафедры металлургии

**Ведущая организация –** ФГБУН Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург

Защита диссертации состоится «16» ноября 2018 г. в 17:00 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=284635>

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

Учёный секретарь  
диссертационного совета

Сулицин Андрей Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Переработка вторичных медьсодержащих материалов в настоящее время является одной из наиболее актуальных задач, стоящих перед цветной металлургией. В то время как запасы минерально-сырьевой базы сокращаются, объемы техногенного медьсодержащего сырья продолжают возрастать. К такому сырью относятся: лома сплавов цветных металлов, шлаки металлургических производств, пыли и прочие медьсодержащие материалы.

Гидрометаллургические способы переработки этих материалов осложняются непостоянством их химического состава, загрязненностью сырья различными неметаллическими примесями и многообразием форм и размеров перерабатываемых материалов, а так же сравнительно низкой производительностью. Эти причины обуславливают ограниченную применимость гидрометаллургических методов. Традиционным способом переработки таких материалов является пирометаллургический способ. Современная тенденция снижения материалоемкости новых изделий вынуждает разработчиков использовать более разнообразные материалы и сплавы. Таким образом, в переработку поступает сырье все более сложного состава, что вынуждает металлургов искать способы наиболее комплексной переработки такого сырья.

**Степень разработанности темы исследования.** В настоящее время большинство предприятий, перерабатывающих вторичное медьсодержащее сырье, используют пирометаллургическую схему переработки ввиду ее относительной простоты и высокой эффективности. Уменьшение объема высококачественных ломов приводит к тому, что переработке подвергаются лома и материалы более сложного состава, содержащие, кроме меди, значительные количества цинка, свинца, никеля и прочих металлов. Большое содержание цинка в исходном сырье значительно затрудняет его переработку. Так, увеличение содержания цинка в шихте приводит к образованию высоковязких тугоплавких цинковистых шлаков. В свою очередь ухудшение свойств шлаков приводит к увеличению потерь меди со шлаком. Помимо этого, значительно возрастает время переработки и, как следствие, увеличиваются операционные затраты. Решением проблемы переработки вторичных медьсодержащих материалов может быть достигнуто оптимизацией физико-химических свойств шлаков за счет перевода цинка, содержащегося в шихте, в самостоятельный продукт – возгоны, с последующим улавливанием их из газовой фазы на фильтрах.

**Целью работы** является разработка научно обоснованного способа снижения потерь меди со шлаками за счет корректировки состава шлаков при переработке ломов цветных металлов в ТРОФ-конвертере и уменьшения объема отвальных шлаков.

### **Задачи исследования:**

1. Провести термодинамическое моделирование для определения равновесных составов системы металл-шлак-газовая фаза применительно к процессу обеднения смеси шлаков в ТРОФ-конвертере.
2. Определить кинетические особенности протекания процессов возгонки соединений цинка при пирометаллургической переработке вторичных медьсодержащих материалов в условиях ТРОФ-конвертера.

3. Определить физико-химические свойства шлаков и возможные методы их корректировки.

4. Изучить гидродинамические особенности работы плавильного агрегата для создания условий, позволяющих увеличить степень обеднения шлаков, сократить время переработки и снизить нагрузку на футеровку, создав тем самым предпосылки для продления кампании агрегата.

5. Установить оптимальные режимы плавки вторичного медьсодержащего сырья в ТРОФ-конвертере.

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

1. На основании данных об анализах заводских шлаков установлена корреляция между содержанием меди и содержанием цинка в шлаке.

2. Изучено влияние металлического железа, применяемого в качестве флюса и восстановителя при плавке медного цинксодержащего лома, на кондиционность шлаков. Показано, что использование в качестве восстановителя металлического железа, позволяет эффективно восстановить соединения цинка, обеспечить снижение содержания цинка в шлаке, что приводит к снижению содержания меди в отвальных шлаках.

3. Изучены физические свойства высокоцинковистых шлаков и возможные способы влияния на них в процессе плавки. Определена энергия активации вязкого течения, которая максимальна в случае гетерогенизации шлака и составляет 460 кДж/моль. Установлено оптимальное соотношение флюсующих компонентов ( $M_{Fe}$  15 %,  $M_{CaO}$  4 % от массы шлака), способствующее получению кондиционных шлаков.

4. Проведен термодинамический анализ совместной переработки высокоцинковистых шлаков и шлаков огневого рафинирования черновой меди.

На основе полученных данных показана принципиальная возможность совместной переработки указанных шлаков с выделением металлической меди в виде донной фазы и переводом значительной части цинка в газовую фазу.

5. Изучены кинетические закономерности отгонки цинка из высокоцинковистых шлаков в условиях ТРОФ-конвертера. Определено, что величина эмпирической энергии активации для максимальной скорости обесцинкования изменяется в интервале от 2,15 до 2,54 кДж/моль в зависимости от содержания ZnO в расплаве. Выявлено, что при температуре расплава 1200 °С процесс обесцинкования протекает в кинетической области. При более высокой температуре 1280 °С скорость процесса, вероятнее всего, лимитируется диффузией.

6. Методами холодного моделирования определены величины диффузионных потоков ZnO к поверхности восстановителя - металлического железа. Интенсивность потоков в условиях турбулентного движения расплава, соответствующего максимальной интенсивности продувки, достигает  $12-15 \cdot 10^{-4}$  моль/(с·м<sup>2</sup>), что подтверждает выводы кинетических исследований о диффузионном характере процесса.

#### **Практическая значимость работы:**

1. Предложен способ совместной переработки высокоцинковистых шлаков совместно со шлаками анодных печей, позволяющий доизвлечь медь и цинк из данных

шлаков, а также снизить объем шлаков, отравляемых для переработки на стороннее предприятие.

2. Даны рекомендации по предотвращению образования и корректировке состава высокоцинковистых шлаков за счет добавки флюсующих компонентов и создания условий, способствующих эффективной отгонке цинка.

3. Обоснована перспективность пирометаллургической технологии переработки ломов цветных металлов и цинксодержащих шлаков с достаточно высоким извлечением меди в черновой металл.

4. Показана необходимость интенсификации массообменных процессов при переработке высокоцинковистых шлаков в ТРОФ-конвертере.

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

В работе использованы методы термогравиметрического и рентгенофазового, атомно-абсорбционного анализа, методы холодного моделирования. Термодинамическое моделирование выполнено с применением пакета прикладных программ «HSC Chemistry 6.1». Измерение вязкости шлаков произведено с использованием ротационного вискозиметра. Результаты опытов обработаны при помощи программного пакета «Statgraphics».

**Степень достоверности и апробация результатов** обеспечиваются представительностью и надежностью исходных данных, использованием сертифицированного оборудования, современных средств и методик проведения исследований, использованием достоверных и аттестованных методик выполнения измерений. Подтверждается согласованностью данных эксперимента и научных выводов, воспроизводимостью результатов лабораторных испытаний и адекватностью разработанной модели.

Достоверность результатов обеспечивается использованием современного оборудования, обновляемых баз данных «HSC Chemistry 6.1», общепринятых отработанных методик экспериментов. А также их воспроизводимостью при использовании ряда независимых современных средств и методик эксперимента, аттестованных методик выполнения измерений, приемами математической статистики при обработке опытных данных, и сопоставлением модельных и экспериментальных данных с данными реальной заводской практики.

#### **Основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту:**

1. Результаты термодинамического анализа совместной переработки шлаков от плавки латунных ломов и шлаков огневого рафинирования и составленная на их основе математическая модель процесса.

2. Кинетические характеристики отгонки цинка из многокомпонентного шлакового расплава.

3. Обоснование изменения технологических режимов схемы переработки вторичных медьсодержащих материалов в ТРОФ-конвертере с целью снижения потерь ценных компонентов со шлаками.

**Апробация работы.** Результаты работы представлялись на всероссийских и международных конференциях, в том числе: Международном совещании «Плаксинские чтения - 2017», г. Красноярск, 2017 г.; Международной молодежной научной

конференции «Физика. Технологии. Инновации. ФТИ-2016», г. Екатеринбург, 2016; Международной конференции «Ресурсосбережение и охрана окружающей среды при обогащении и переработке минерального сырья», (Плаксинские чтения 2016) г. Иркутск 2016 г.; Международном совещании «Плаксинские чтения - 2015», г. Иркутск, 2015 г.

**Личный вклад автора** состоит в теоретическом обосновании, формировании 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.

**Основные результаты** работы доложены на четырех всероссийских и международных научно-технических конференциях. По теме диссертации опубликовано 7 научных работ, в том числе в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК (WOS, Scopus) – 3.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работ изложена на 192 страницах машинописного текста, включает 85 рисунков, 24 таблиц и состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы из 97 источников отечественных и зарубежных авторов.

*Автор выражает благодарность научному руководителю кандидату технических наук, доценту Агееву Никифору Георгиевичу, доктору технических наук, профессору Жукову Владимиру Петровичу, ведущему инженеру кафедры МЦМ Колмачихину Борису Валерьевичу и Колмачихиной Эльвире Барыевне, коллективу кафедры «Металлургии цветных металлов» УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, специалистам ЗАО «Новгородский металлургический завод» 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 краткий обзор современных способов переработки цветных металлов (ВЦМ). Показано, что наибольшей простотой и эффективностью обладает пирометаллургическая технология. Описана схема работы наклонных короткобарабанных вращающихся печей типа печи КАЛДО и ТРОФ-конвертера. Показано, что одним из наиболее эффективных агрегатов для переработки вторичных медьсодержащих материалов является ТРОФ-конвертер, который позволяет выполнять операции плавки и конвертирования. При этом нагрев и плавление материала происходит за счет тепла от сгорания природного газа.

Отличительной особенностью агрегатов такого типа является конструкция вращающегося рабочего пространства «колбы» конвертера, что обеспечивает перемешивание загруженных материалов на этапе разогрева и плавления. Вследствие чего создаются наиболее оптимальные условия для отгонки летучих компонентов шихты.

Так же в главе дано описание существующей технологии плавки медьсодержащего лома и переработки шлаков на АО «Новгородский металлургический завод». В главе представлены характеристики сырья и продуктов, выбраны основные направления модернизации технологии переработки медьсодержащего сырья в ТРОФ-конвертере.

**Вторая глава** посвящена исследованию влияния состава шихты ТРОФ-конвертера АО «НМЗ» на распределение меди между продуктами плавки. На основании статистической обработки заводских данных за 2012-2013 гг. выявили следующие корреляционные зависимости содержания меди в шлаках плавки ломов от содержания свинца (Рисунок 1) и цинка (Рисунок 2) в шлаке.

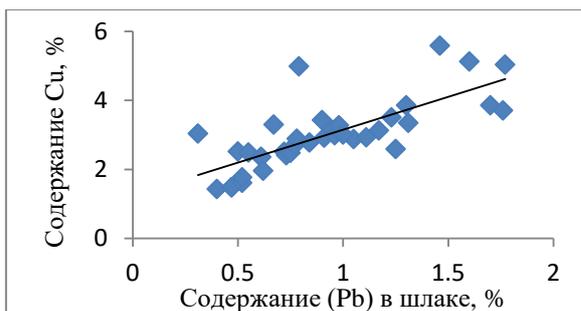


Рисунок 1–Зависимость содержания Cu в шлаке от содержания Pb в шлаке

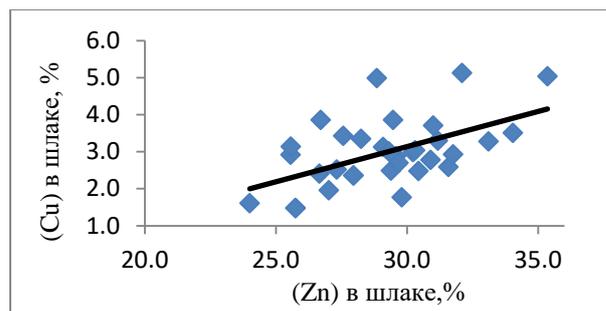


Рисунок 2– Зависимость содержания Cu в шлаке от содержания Zn в шлаке

Из рисунков следует, что увеличение содержания цинка и свинца приводит к росту содержания меди в шлаке. Однако, в отличие от свинца, в диапазоне концентраций цинка 20-25 мас. % наблюдается более резкое увеличение содержания меди в шлаке (Рисунок 3). Дополнительно определена зависимость температуры плавления шлака от содержания в нем цинка (Рисунок 4).

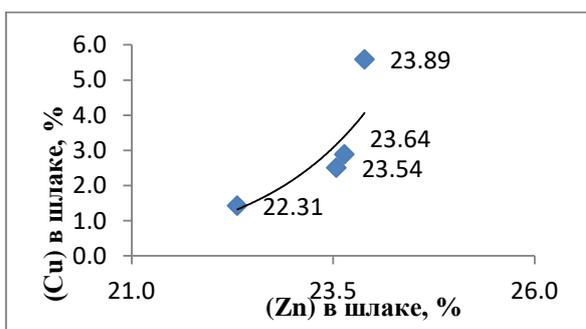


Рисунок 3 – Зависимость содержания Cu в шлаке от Zn при гетерогенизации шлака

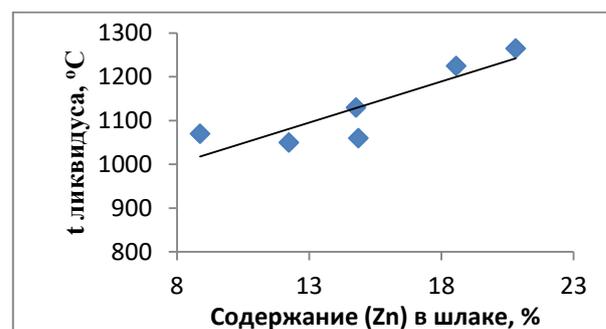


Рисунок 4 – Температура ликвидуса шлаков в зависимости от соотношения Zn/SiO<sub>2</sub>

Насыщение шлака цинком приводит, к повышению температуры плавления шлака, что в совокупности с явлением гетерогенизации создает условия для увеличения вязкости шлака и как следствие, росту механических потерь меди с ним.

На основании полученных данных разработана номограмма, позволяющая определить содержание SiO<sub>2</sub> Fe, CaO в зависимости от содержания Zn в шлаке (Рисунок 5).

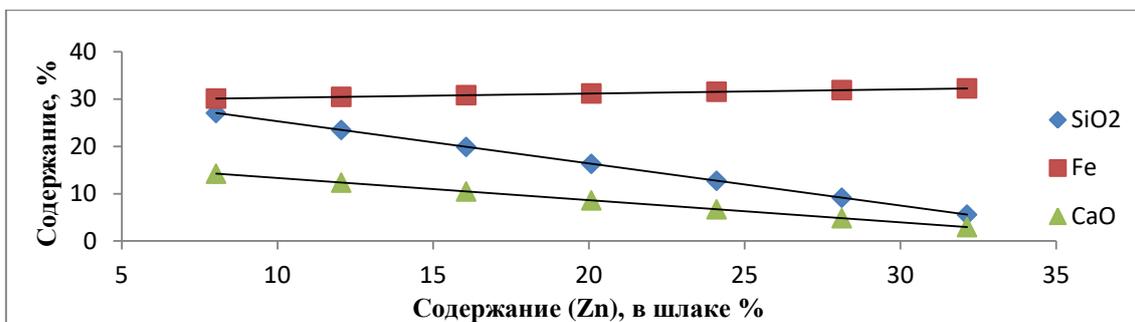


Рисунок 5 – Зависимость содержания CaO, SiO<sub>2</sub>, Fe от содержания цинка в шлаке

На основании данных о существующей технологии переработки ВЦМ, влиянии цинка на свойства шлакового расплава и особенностях работы ТРОФ-конвертера сформулированы цели дальнейшего исследования.

Образование высокоцинковистых шлаков обуславливает необходимость их дальнейшей переработки на другом предприятии, что, помимо значительных затрат на транспортировку шлака, приводит к увеличению доли безвозвратных потерь меди с данными шлаками.

*Третья глава* посвящена исследованию физико-химических свойств шлаков от плавки ВЦМ (далее шлаки ТРОФ), термодинамическому моделированию совместной переработки шлаков огневого рафинирования черновой меди (далее шлаков МЕРЦ) и шлаков ТРОФ и представлены результаты исследования кинетических закономерностей отгонки цинка из шлаков.

*Исследование физико-химических свойств шлаков*

В ходе исследования физико-химических свойств шлаков была определена температура плавления синтетических шлаковых расплавов в диапазоне концентраций ZnO 0 – 20 мас. % (Рисунок 6).

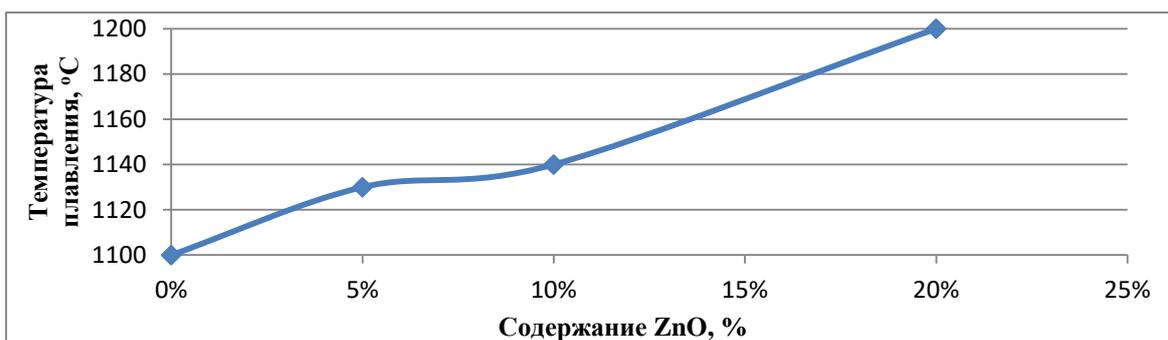


Рисунок 6 – Изменение температуры плавления синтетического шлака от содержания ZnO

Для снижения температуры плавления высокоцинковистых шлаков предложен метод их совместной переработки с шлаками МЕРЦ. Помимо снижения температуры плавления, это также позволит снизить вязкость получаемых шлаковых расплавов.

На экспериментальной установке в среде аргона с помощью ротационного вискозиметра измерили вязкость синтетических фаялитовых шлаковых расплавов в зависимости от содержания в них цинка (Рисунок. 7).

На основании полученных зависимостей (Рисунок 7) выполнен расчет эмпирической величины энергии активации вязкого течения при гетерогенизации шлака, она составляет ~ 460 кДж/моль.

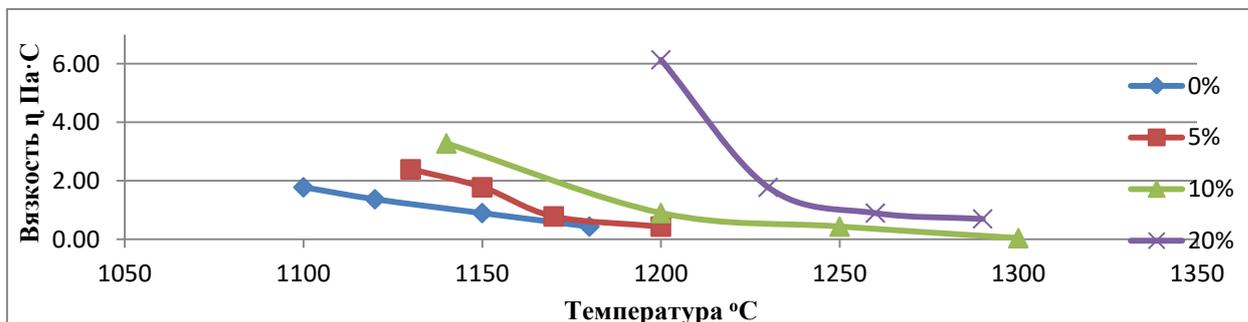


Рисунок 7 – Вязкость шлака от содержания оксида цинка в диапазоне от 1100 – 1300 °С

В главе также представлены элементные составы промышленных шлаков ТРОФ и МЕРЦ. Показано, что шлаки ТРОФ имеют высокое содержание цинка, в среднем около 25 мас. %. Исходя из результатов рентгенофазового анализа исследуемых шлаков были определены их рациональные составы.

#### *Термодинамическое моделирование совместной переработки шлаков*

На основании данных о составах шлаков, режимах работы ТРОФ-конвертера было выполнено термодинамическое моделирование совместной плавки шлаков ТРОФ и МЕРЦ в ТРОФ-конвертере. Исходя из объемов образования обоих типов шлаков, было определено их соотношение равное 60:40 по массе.

Термодинамическое моделирование производили в среде пакета прикладных программ «HSC Chemistry». Целью моделирования является определение оптимальных параметров, обеспечивающих наиболее полный перевод меди в донную фазу, с одновременной отгонкой цинка в возгоны, а именно: количество флюсующих компонентов (Fe, CaO, SiO<sub>2</sub>), коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  и температуры.

Моделирование производили по плану полного факторного эксперимента с использованием программного пакета Statgraphics.

В модели выполнен расчет на 100 кг смеси шлаков. Состав смеси шлаков для проведения термодинамического моделирования приведен в таблице 1.

Таблица 1 - Исходный состав смеси шлаков (мас. %) для термодинамического моделирования

Соединение									
2FeO·SiO <sub>2</sub>	ZnSiO <sub>3</sub>	2CaO·SiO <sub>2</sub>	PbSiO <sub>3</sub>	Cu <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	ZnO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
11.27	21.69	7.21	2.58	7.58	7.54	3.57	21.61	5.64	4.00

Из-за большого числа переменных параметров моделирование производили в два этапа. На первом этапе влияние атмосферы печи и коэффициента  $\alpha$  не учитывали, тем самым получили термодинамическую модель подсистемы расплав – флюсующие материалы (Рисунок 8). Также определили влияние температуры на распределение цинка по продуктам плавки (Рисунок 9).

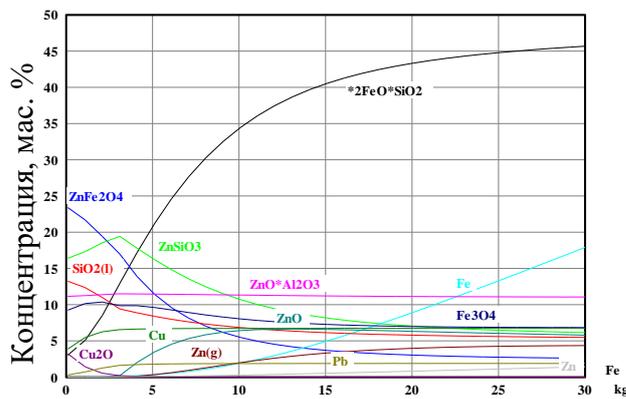


Рисунок 8 – Диаграмма равновесного состояния шлаковой системы в зависимости от добавки металлического железа при температуре 1200 °С.

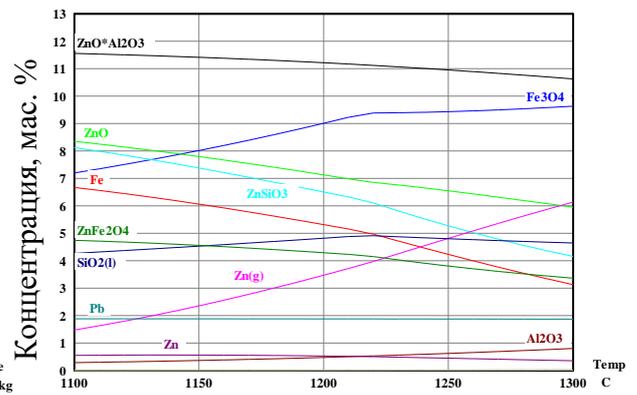


Рисунок 9. – Диаграмма равновесного состояния шлаковой системы в диапазоне температур 1100 - 1300 °С.

На втором этапе исследовали влияние газовой фазы и коэффициента  $\alpha$  для найденных на первом этапе оптимальных значений добавок флюсующих компонентов и восстановителя. Исходя из стехиометрий реакций полного и неполного горения природного газа рассчитали состав газовой фазы при различных коэффициентах  $\alpha$ . Рассматривали состояние системы при  $\alpha=0.9$ ,  $\alpha=1.1$  (Рисунок 10, 11) в диапазоне температур 1100-1300°С.

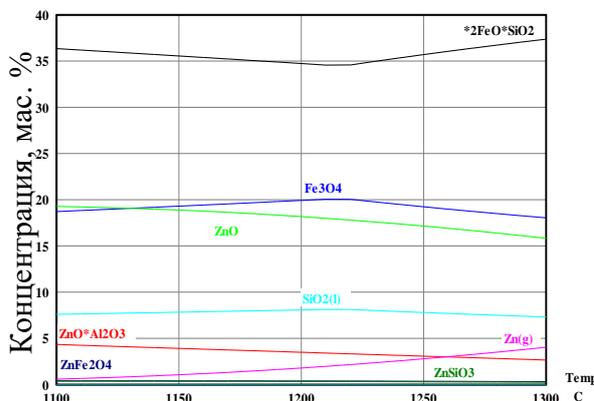


Рисунок 10 – Диаграмма равновесного состояния шлаковой системы при  $\alpha = 0.9$ .

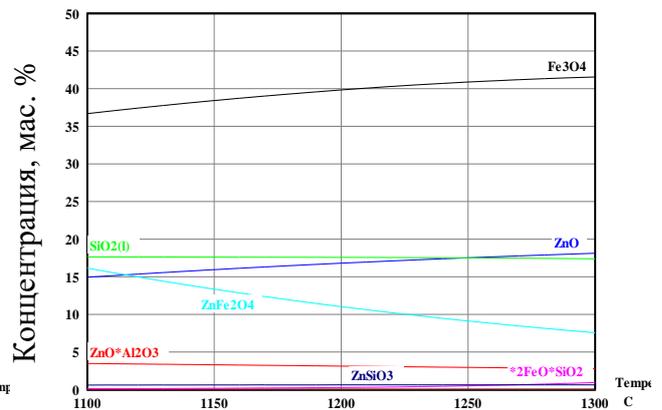


Рисунок 11 – Диаграмма равновесного состояния шлаковой системы при  $\alpha = 1.1$

При анализе данных получено следующее уравнение регрессии извлечения цинка в металл и газовую фазу (1):

$$\text{Zn (sum)} = -312.08 + 0.45 \cdot t + 191.375 \cdot \alpha - 0.01625 \cdot t \cdot \alpha - 142.40 \cdot \alpha^2 \quad (1)$$

где: Zn (sum) – суммарное извлечение Zn, t – температура,  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха.

В уравнении отсутствуют массы Fe и Ca, так как их оптимальное количество было рассчитано на первом этапе термодинамического моделирования.

Исходя из результатов термодинамического моделирования нами установлено, что при переработке смеси реальных заводских шлаков максимальная степень извлечения цинка в газовую фазу может достигать 81 % при следующих параметрах: t 1340 °С,  $M_{\text{Fe}}$  15 %,  $M_{\text{CaO}}$  4 %,  $\alpha = 0.8$ .

*Исследование кинетических закономерностей отгонки цинка из шлаков.*

Термодинамическое моделирование способно прогнозировать только равновесное состояние исследуемой системы, достижение которого может быть невозможно из-за неприемлемых временных затрат в условиях технологического процесса. Для уточнения справедливости сделанных выводов нами было выполнено исследование кинетических закономерностей отгонки цинка из шлаков.

Исследование производили на синтетических шлаках, состав приведен в таблице 2.

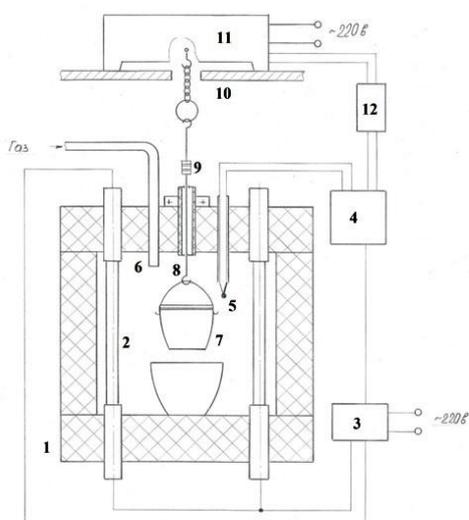
Таблица 2 – Состав образцов синтетического шлака

Компонент	Содержание, мас. %					
	11	15	19	23	27	31
ZnO	11	15	19	23	27	31
FeO	48.9	46.7	44.5	42.3	40.1	37.9
SiO <sub>2</sub>	32.3	30.8	29.4	27.9	26.5	25.0
CaO	7.8	7.5	7.1	6.8	6.4	6.1

В качестве восстановителя использовали металлическое железо. Массу восстановителя рассчитывали исходя из стехиометрии реакции 1.



Исследование проводили на установке состоящей из камерной печи с карбидкремниевыми нагревателями. В своде печи был проделан канал с направляющей, через которую проходила нихромовая струна, для подвески образца к электронным весам. В непосредственной близости от подвески образца была размещена термопара и проделан канал для подачи газа. Расход газа контролировали при помощи ротаметра. Над печью за теплозащитным экраном установили аналитические весы Ohaus pioneer с ценой деления  $1 \cdot 10^{-4}$  г. Для контроля температуры печи использовали ПИД-регулятор ОВЕН ТРМ-210, работающий в связке с регулятором мощности ТТР HD-4025LA. Весы Ohaus pioneer и ПИД-регулятор ОВЕН ТРМ-210 имеют интерфейсы для обмена данными с ПК. Таким образом, удалось осуществить одновременную фиксацию температуры, массы и времени при помощи ПК с высокой точностью. Схема установки приведена на рис 12.



- 1 – камера печи,
- 2 - карбидкремниевые нагреватели,
- 3 – регулятор мощности,
- 4 – регулятор температуры,
- 5 – термопара,
- 6 – подвод газа,
- 7 – тигель с образцом,
- 8 – подвес,
- 9 – изолятор,
- 10 – теплоизолирующий экран,
- 11 – весы,
- 12 - ПК

Рисунок 12 – Установка для проведения кинетических исследований

Измерения производили по следующей методике. Подогретую до 250 °С навеску шлака (20±2 г) подвешивали в разогретой печи, при этом печь продували аргоном. Расход аргона составлял 3-5 дм<sup>3</sup>/мин, что обеспечило надежное вытеснение воздуха из объема печи. После закрепления образца, с интервалом 10 с, фиксировали массу образца и температуру печи, погрешность измерений составляла 4•10<sup>-3</sup> г или 0.02 % от массы навески. Из опытов установили, что изменение массы образца завершилось в течение 700 с. По окончании опыта образец извлекали из печи и охлаждали на воздухе. После охлаждения продукты плавки подвергали химическому анализу с применением атомно-абсорбционного спектрофотометра с целью определения фактического содержания цинка в исходной смеси и остаточного его содержания после обесцинкования шлака.

В ходе опытов исходя из убыли массы образца были получены следующие зависимости скорости отгонки цинка от продолжительности опытов при различных температурах и содержаниях цинка в образцах 15, 23, 31 мас. % ZnO (Рисунок 13).

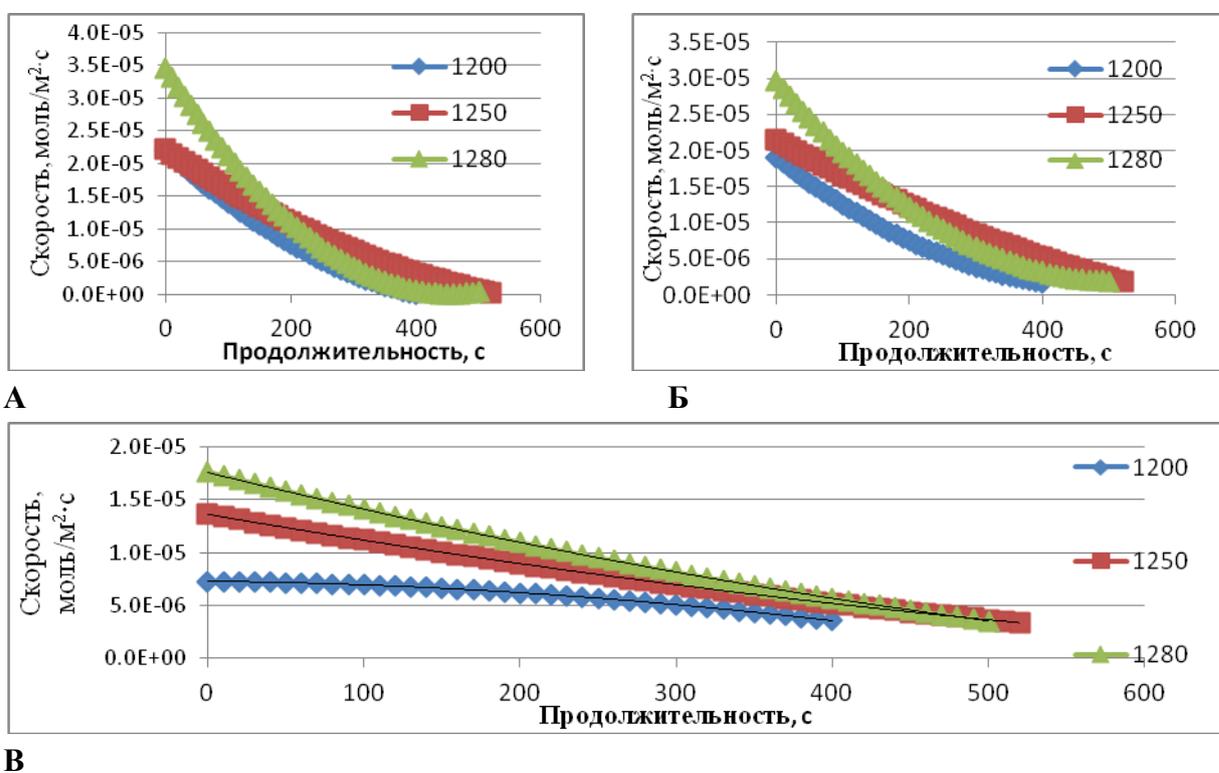


Рисунок 13 – Зависимости скорости реакции от продолжительности при различных начальных содержаниях Zn в навеске: а-15 % ZnO, б – 23 % ZnO, в – 31 % ZnO

Анализ полученных данных показал, что наблюдаемый порядок процесса восстановления равен 0.2 по цинку. При более низкой температуре наблюдается смена порядка от 0.3 до 1.2, что может объясняться изменением вязкости расплава.

Энергию активации рассчитывали при одинаковых исходных концентрациях цинка в расплаве, характерных в начальной стадии процесса (12 мас. %) при различных температурах, согласно (Рисунок 13).

В приведенном диапазоне температур (1200 – 1280 °С) наблюдается порядок реакции близкий к первому.

Результаты исследования кинетики обесцинкования показывают, что наблюдаемый порядок процесса восстановления по цинку равен 0.2 и при более низкой температуре наблюдается смена порядка от 0.3 до 1.2.

Величина эмпирической энергии активации для максимальной скорости обесцинкования изменяется в интервале от 21.5 до 25.4 кДж/моль в зависимости от содержания ZnO в расплаве. Указанные параметры являются свидетельством протекания процесса в кинетической области при температуре расплава 1200 °С. При более высокой температуре 1280 °С скорость процесса, вероятнее всего, лимитируется диффузией, о чем свидетельствует величина порядка близкого к единице.

Предварительными экспериментами показано, что кинетика отгонки цинка связана с величиной реакционной поверхности и соответственно с гидродинамикой барботируемой ванны ТРОФ-конвертера. Поэтому дополнительно исследовали гидродинамическую обстановку в реакционной зоне.

**Четвертая глава** посвящена изучению гидродинамики работы ТРОФ-конвертера.

В ТРОФ-конвертере применяются два способа, обеспечивающих интенсификацию массообменных процессов. В присутствии твердых кусковых материалов организовано перемешивание (перекачивание кусков) материала за счет вращения колбы. После расплавления материала вращения колбы не учитывали. В этот период для обеспечения наилучшего контакта газовой фазы с расплавом применяют непогруженное дутье, реализованное посредством введения в конвертер фурмы.

Для составления и анализа картины материальных потоков использовали методологию холодного моделирования. В качестве образца принят ТРОФ-конвертер эксплуатирующийся на АО «НМЗ» и на основании геометрии формы, размеров, положения рабочего пространства изготовлена в масштабе 1:10 (Рисунок 14) холодная модель выполнена из прозрачного поликарбоната.

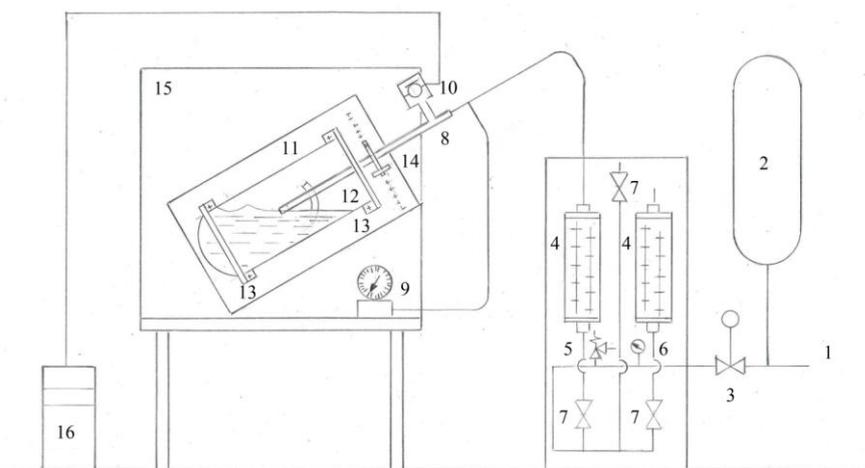


Рисунок 14 – Общий вид установки для проведения холодного моделирования: 1 – подвод сжатого воздуха, 2 – ресивер, 3 – регулятор давления, 4 – расходомер, 5 – предохранительный клапан, 6 – манометр, 7 – вентиль, 8 – фурма, 9 – манометр, 10 – микрофон, 11 – наклонная траверса, 12 – колба модели, 13 – опорные бандажи, 14 – крепление фурмы, 15 – рама модели, 16 – ПК

В качестве модельной жидкости использовали прозрачный водный раствор хлористого натрия, продувку вели компрессорным воздухом. В процессе холодного моделирования варьировали следующие параметры: угол наклона колбы, угол наклона фурмы, расстояние от фурмы до поверхности жидкости, расход дутьевого воздуха. Направление и частоту вращения колбы модели в экспериментах не учитывали, ввиду малой смачиваемости поликарбоната жидкостью, которая практически не приводилась в движение.

Продувку осуществляли компрессорным воздухом через одну фурму. Расход дутья контролировали по ротаметрам.

Подбор параметров продувки выполнили на основании равенства критерия Рейнольдса ( $Re$ ) для объекта и модели ( $Re_{\text{мод}} \text{ idem } Re_{\text{об}}$ ). Критерий  $Re$  (2) выражает отношение сил инерции к силе вязкости.

$$Re = \frac{w \cdot l}{\nu} = \frac{w \cdot l \cdot \rho}{\mu} \quad (2)$$

где  $w$  – скорость движения газовой струи, м/с;  $l$  – диаметр фурмы м;  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – динамическая вязкость жидкости, Па·с;  $\nu$  – кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с.

Вычисленный критерий подобия  $Re = 5.57 \cdot 10^4$  свидетельствует об истечении газа в турбулентном режиме.

Фиксацию движения жидкости производили методом высокоскоростной видеосъемки с последующей обработкой полученных материалов. Для визуализации потоков в жидкость добавляли индикаторы (Рисунок 15).

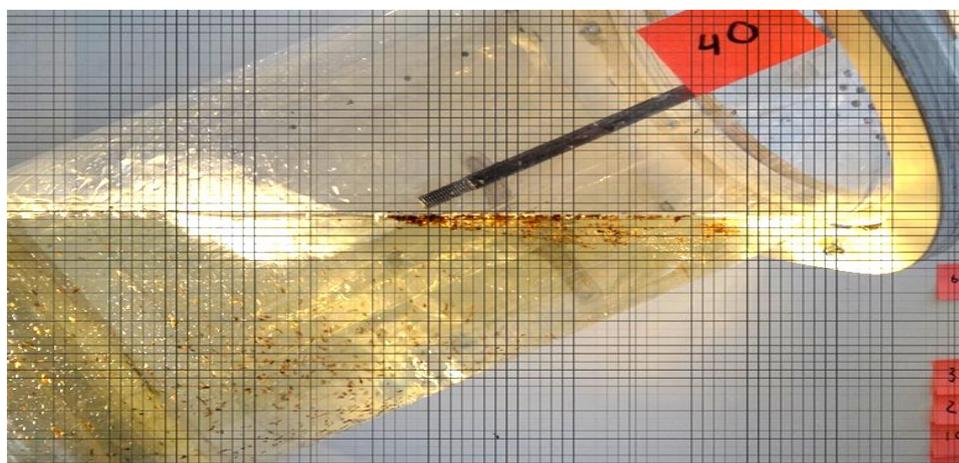


Рисунок 15 – Фотография каверны с наложенной масштабной сеткой.

При помощи координатной сетки, наложенной на изображения, определили глубину осевого и поперечного проникновения струи в жидкость, объем вытесненной жидкости. Эти данные были использованы для оценки полной энергии сообщаемой дутьем расплаву. Величины полной энергии струи для модели и ТРОФ-конвертера составили 110.3 Дж и 23.9 кДж соответственно.

Анализ данных, полученных на холодной модели, показал сложную картину развития гидро- газодинамических потоков в объеме колбы конвертера (Рисунок 16, 17).

Под воздействием дутья расплав на поверхности ванны движется от среза фурмы к днищу колбы конвертера, где, огибая его, опускается и вдоль нижней образующей колбы возвращается в предфурменную зону.

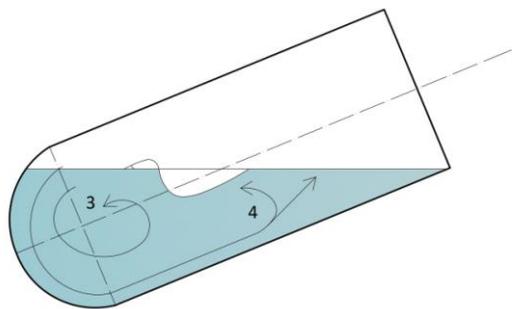


Рисунок 16 – поперечная проекция потоков

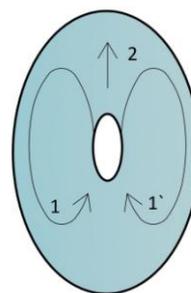


Рисунок 17 – осевая проекция потоков

Из полученных данных определили зависимость скорости движения жидкости в модели от объемного расхода дутья. На основании определенного ранее значения критерия Рейнольдса и вязкости шлака, полученные данные были интерпретированы к работе ТРОФ-конвертера.

Определив коэффициент массоотдачи, рассчитали число Шмидта  $Sc$  (3).

$$Sc = \frac{\nu}{D} = 7.43 \cdot 10^3 \quad (3)$$

где  $\nu$  - вязкость  $m^2/c$ ,  $D$  – коэффициент молекулярной диффузии

Число Шмидта показывает соотношение интенсивностей диффузии импульса и диффузии вещества.

С помощью  $Sc$  определили критерий Шервуда  $Sh$  (4), который представляет собой коэффициент массоотдачи и зависит от гидродинамического режима движения материала.

$$Sh = 0.332 \cdot Re_x^{0.5} \cdot Sc^{1/3} \quad (4)$$

Результаты вычислений приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты вычислений.

Скорости жидкости в модели, м/с	Скорости жидкости в конвертере, м/с	Значение критерия $Re$ для модели	Гидродинамический режим	Значение критерия $Sh$ для конвертера	Коэф-нт массоотдачи, $\beta$
0.003	0.050	630	ламинарный	16.24	$1.73 \cdot 10^{-6}$
0.006	0.100	1260		22.97	$2.45 \cdot 10^{-6}$
0.007	0.116	1470		24.81	$2.65 \cdot 10^{-6}$
0.009	0.149	1890		28.14	$3 \cdot 10^{-6}$
0.011	0.183	2310		31.10	$3.32 \cdot 10^{-6}$
0.013	0.216	2730	переходный	765.89	$8.17 \cdot 10^{-5}$
0.017	0.282	3570		949.22	0.000101
0.022	0.365	4620		1166.67	0.000125
0.030	0.498	6300		1495.22	0.00016
0.037	0.614	7770		1768.36	0.000189
0.044	0.730	9240	турбулентный	2031.29	0.000217
0.056	0.930	11760		3079.42	0.000329
0.074	1.228	15540		3848.62	0.000411

Из таблицы 3 следует, что в турбулентном режиме константа массоотдачи  $\sim$  на 4 порядка выше, чем значение коэффициента молекулярной диффузии  $D$ .

С помощью выражения 5 произвели оценку значения величины диффузионного потока на поверхности восстановителя - металлического железа.

$$J = \beta \cdot C_{ZnO} \quad (5)$$

Максимальная концентрация  $ZnO$  в смеси перерабатываемых шлаков составляет 30 мас. % или  $12.05 \text{ кмоль/м}^3$ . На основании термодинамического моделирования установили, что оптимальная масса восстановителя (железа) составляет 15 % от массы смеси шлаков, что соответствует 4.05 т при загрузке конвертера в 27 т. Данное количество восстановителя имеет минимальную реакционную поверхность, равную  $3.13 \text{ м}^2$  (в случае сферы).

С учетом концентрации  $ZnO$  в расплаве и величины константы массоотдачи диффузионный поток к поверхности восстановителя составит от  $6.66 \cdot 10^{-6} \text{ моль/(с} \cdot \text{м}^2)$  в случае малоинтенсивного воздействия струи фурмы на расплав (ламинарный режим течения) и до  $12-15 \cdot 10^{-4} \text{ моль/(с} \cdot \text{м}^2)$  при условии турбулентного течения расплава, вызванного интенсивным воздействием струи фурмы при продувке с максимальными величинами объемного расхода газа.

Сопоставление величин диффузионного потока на поверхность восстановителя и величин скорости восстановления и отгонки цинка, определенных ранее в главе 3, дают основания считать, что процесс развивается в диффузионном режиме и его скорость ограничена возможностями подвода  $ZnO$  к поверхности металлического железа.

Косвенным подтверждением этого является визуально наблюдаемая картина продувки смеси шлаков в конвертере с добавкой металлического железа после расплавления шлака. Подача дутья через фурму приводит к резкому увеличению количества возгонов цинка в отходящих газах, если объемный расход газа превышает величину, соответствующую достижению переходного режима течения расплава.

Полученные в ходе холодного моделирования данные были подтверждены методом видеофиксации движения расплава на поверхности ванны реального агрегата. Показано соответствие наблюдаемого движения данным, полученным в ходе холодного моделирования.

*В пятой главе* представлены результаты исследования тепловой работы ТРОФ-конвертера. Определены основные факторы, влияющие на тепловой баланс.

Источником тепла для плавления материала служат два горелочных устройства суммарной мощностью 5 МВт, установленные в водоохлаждаемой крышке конвертера. С целью снижения потерь тепла с отходящими газами содержание кислорода КВС на горелках держат в районе 30 %. На этапе конвертирования продувку расплава ведут непогружным дутьем обогащенным кислородом через коаксиальную фурму.

За счет вращения колбы происходит выравнивание температуры по поверхности футеровки, а также более быстрый разогрев и расплавление массы материала за счет его перемешивания.

В конструкции колбы конвертера применена многослойная футеровка, рабочий слой выполнен из кирпича ХПТ и имеет толщину 0.3 м, второй слой выполнен из кирпича

ПХС и имеет толщину 0.115 м. При помощи модуля «Heat Loss Calculations» программного пакета «HSC Chemistry» выполнен анализ распределения температуры по толщине футеровки в зависимости от толщины рабочего слоя футеровки (Рисунок 18). Из профиля распределения температур следует, что наибольшим тепловым сопротивлением в конструкции футеровки обладает слой асбокартона.

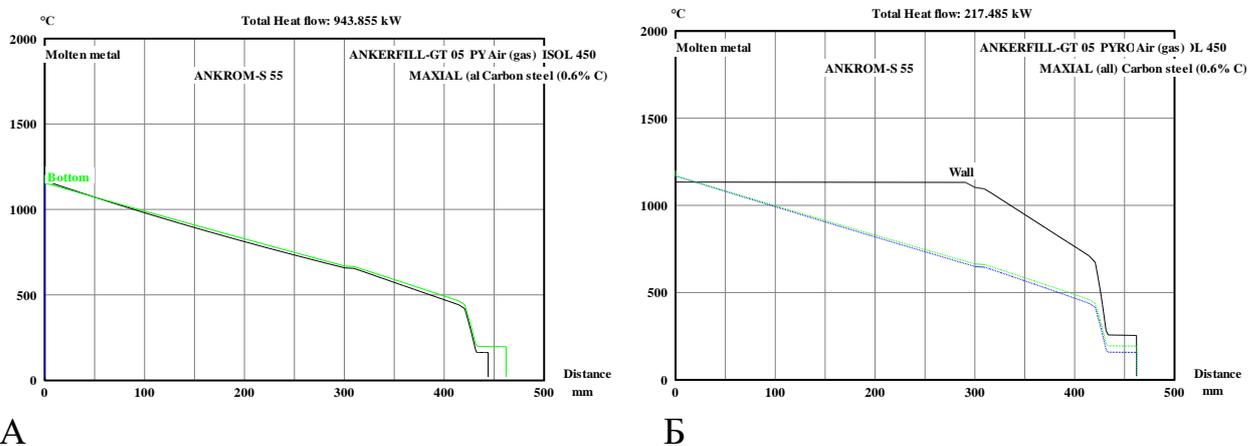


Рисунок 18 – Профиль температур по толщине футеровки ТРОФ-конвертера: А- огнеупор исходной толщины, Б – изношенный огнеупор.

В ходе анализа было установлено, что, в зависимости от толщины рабочего слоя огнеупора, температура поверхности кожуха будет изменяться от 190 °С при толщине рабочего слоя футеровки 0.3 м до 280 °С при полном износе рабочего слоя футеровки. Это приводит к возрастанию температуры на границе ПХС-асбокартон выше предельной рабочей температуры 600 °С.

На основании полученных данных о размерах, температуре кожуха и конструкции футеровки определили количество тепла, теряемого с поверхности ТРОФ-конвертера.

Зная типы и массы огнеупорных материалов, температуры рабочего пространства ТРОФ-конвертера во время работы и остановов, рассчитали количество тепла аккумулированного футеровкой.

При помощи программного пакета «HSC Chemistry» определили величину радиационных и конвективных потерь через горловину.

Исходя из тепловых эффектов реакций полного и неполного горения природного газа рассчитали тепловой эффект от сжигания одного моля  $\text{CH}_4$  при различных коэффициентах избытка кислорода  $\alpha$ .

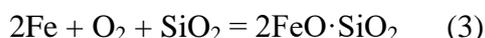
На основании результатов термодинамического моделирования и данных о составах шлаков определили основные реакции, протекающие в ТРОФ-конвертере при переработке смеси шлаков и их тепловые эффекты.

Для расчета теплового баланса использовали модуль «Heat and Material Balance» пакета прикладных программ «HSC Chemistry».

На основании проведенного расчета составлены тепловой и материальный балансы для переработки 30 т смеси шлаков в ТРОФ-конвертере.

Показано, что основными статьями потерь тепла являются: тепло отходящих газов ~ 61 %, тепло, аккумулированное футеровкой ~ 7.7 % и тепло, теряемое через футеровку ~ 4.3 %.

Основными экзотермическими реакциями являются горение паров цинка (2), а также окисление и ошлакование металлического железа (3).



Суммарная доля экзотермических реакций в тепловом балансе переработки шлаков в ТРОФ-конвертере составляет ~ 7.3 %.

По мере износа футеровки увеличивается тепловой поток, теряемый через корпус конвертера. Контроль состояния футеровки, своевременный ее ремонт способствует снижению этих потерь, что позволит поддерживать температуру расплава в оптимальном диапазоне для эффективной отгонки летучих компонентов.

Для интенсификации отгонки цинка необходимо поддерживать в печи нейтральную или восстановительную атмосферу. Добиться этого можно ведя процесс при коэффициенте расхода кислорода на горелках  $\alpha < 1$ .

**В шестой главе** представлены результаты промышленных испытаний переработки латунных ломов и обеднения медьсодержащих шлаков в ТРОФ-конвертере на АО «Новгородский металлургический завод». Целью опытных плавов ломов являлось достижение остаточного содержания меди в шлаке 4.0 мас. %.

#### *Плавка ломов*

На первом этапе плавку вели по обычной технологии при следующем составе шихты: смешанный лом-18; радиаторы – 9.0; стружка -3; всего - 30 т. Расход флюсов на плавку: SiO<sub>2</sub> - 2000; известь – 200; Fe – 2600.

В этот период тщательно контролировали все параметры, входящие в сменный рапорт и дополнительно: расход топлива и окислителя на горелку, м<sup>3</sup>/ч, коэффициент избытка воздуха; температуру шлака, состав и температуру газов в печи.

Пробы шлака отбирали на стадиях плавления материала, и окисления расплава. Анализ шлака производили по следующим компонентам: Cu, Pb, Ni, Fe, Sn, Zn, CaO, SiO<sub>2</sub>.

Во время плавки проводили визуальное наблюдение за состоянием ванны, плавкостью и текучестью расплава. При необходимости корректируется состав шлака.

На втором этапе, который следует сразу после контрольной плавки, использовали одинаковый с первым этапом состав шихты. Дополнительно для отгонки цинка вводили кокс. Состав шихты и флюсов приведен в таблице 4.

Таблица 4 - Состав шихты и флюсов для опытных плавов ломов.

№ Пл-ки	Металлсодержащие Материалы	Масса, кг	Флюсы	Масса, кг	Кокс, кг
36	1. Смешанный лом.	18000	Известь	200	200.0
	2. Радиаторы латунные.	9000	Fe	600	
	3. Стружка, латунная	3000	SiO <sub>2</sub>	2750	
	Всего.....	30000	Всего	3550	200.0

Продолжение таблицы 4

37	1. Смешанный лом.	18000	Известь	200	400,0
	2. Радиаторы латунные.	9000	Fe	500	
	3. Стружка, латунная	3000	SiO <sub>2</sub>	2750	
	Всего.....	30000		3450	400,0
38	1. Смешанный лом.	18000	Известь	200	600.0
	2. Радиаторы латунные.	9000	Fe	400	
	3. Стружка, латунная	3000	SiO <sub>2</sub>	2750	
	Всего.....	30000		3350	600.0
39	1. Смешанный лом.	18000	Известь	200	400
	2. Радиаторы латунные.	9000	Fe	500	
	3. Стружка, латунная	3000	SiO <sub>2</sub>	2750	
	Всего.....	30000		3450	400

Ввиду особенностей конструкции ТРОФ-конвертера добавку восстановителя рекомендовано производить порционного, чтобы избежать вспенивания шлакового расплава.

Ниже приведены наиболее характерные результаты последних четырех плавов (№ 36, 37, 38, 39), из которых 3 являлись контрольными (№ 36, 37, 38) и одна (№ 39) экспериментальной. Составы шлаков полученных в ходе плавов приведены в таблице 5.

Таблица 5 - Взаимосвязь содержания меди, цинка, железа в шлаке

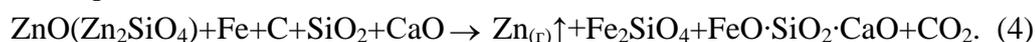
№	№ плавки	Содержание в шлаке, мас. %		
		Fe	Zn	Cu
1	36	22.52	19.90	1.28
2	-	25.14	22.70	3.01
3	-	17.98	24.10	9.05
4	37	22.02	26.80	7.76
5	-	14.62	7.84	0.55
6	-	4.36	11.30	19.99
7	38	15.61	29.44	2.73
8	-	17.20	32.70	2.40
9	-	12.24	31.54	11.72
10	39	26.03	25.01	2.30
11	-	20.60	24.18	1.16
12	-	21.51	27.42	4.61

Анализ данных подтвердил ранее обнаруженную закономерность о взаимосвязи содержания цинка и железа в шлаке на потери меди. При повышении содержания Zn в шлаке наблюдается повышение концентрации Cu, при относительно постоянном содержании железа (строки 1-4; 5-7).

Достигнутое снижение содержания меди объясняется переводом запутавшихся ее частиц в шлаке в донный расплав чернового металла за счет образования более прогретого

расплава и принятого соотношения флюсующих компонентов, обеспечивающих образование текучего и легкоплавкого шлака.

Заметим, что в контрольной плавке № 38, за которой следовала сразу экспериментальная, содержание цинка составляло 29.44; 32.70; 31.54, %, а в экспериментальной снижено до величин 25.01; 24.18; 27.42 %. На уменьшение концентрации цинка положительно влияла добавка дробленого углеродсодержащего огарка, что привело вместе с добавкой железа к обесцинкованию шлака по схеме 4



В ходе плавки было достигнуто снижение содержания меди в шлаке с 9.05; 19.99; 11.72 до 4.61 %.

#### *Обеднение шлаков*

Методика проведения испытаний была аналогичной, как при плавке ломов. Все плавки проводились на шихте следующего состава: шлак МЕРЦ  $\text{C}_{\text{Cu}}$  20 %, Би-металл (6.6 % Cu). Вместо железного лома в качестве восстановителя был загружен Би-металл, основным компонентом которого являлось железо и медь (6.6 % Cu).

Контроль параметров осуществлялся аналогично.

На втором этапе, который следует сразу после контрольной базовой плавки, использовали шихту идентичную первому этапу. Дополнительно для отгонки цинка вводили углеродсодержащий огарок. Состав шихты и флюсов приведен в таблице 6.

Таблица 6. - Состав и масса шихтовых материалов для опытных плавков по обеднению шлаков

№ пл-ки	Металлсодержащие материалы	Масса, кг	Содерж. Cu, %	Флюсы	Масса, кг	Кокс, кг
40				Известь	235	
	Шлак	26145	13.26	Песок	667	
				Железо	3925	
	Всего	26145			4732	183

Всего за время испытаний из-за недостатка сырья была проведена 1 плавка (№ 40). Исходным материалом являлся шлак огневого рафинирования печи МЕРЦ. На основании проведенного термодинамического моделирования разработаны следующие рекомендации для переработки смеси шлаков с содержанием цинка около 18 %:  $\text{M}_{\text{Fe}}$  15 %,  $\text{M}_{\text{CaO}}$  4 %, температура 1250 °С,  $\alpha = 0.95$ .

Составы шлаков полученных в ходе плавков приведены в таблице 7.

Таблица 7 - Результаты плавков по обеднению шлаков

№ пл-ки	Ковш	Cu, %	Zn, %	Fe, %
40	Шлак ковш №5	4.39	7.6	9.86
	Шлак ковш №30	2.83	7.16	14.89
	Шлак ковш №33	2.66	7.14	15.83

Продолжение таблицы 7

Шлак ковш №4	2.92	7.17	15.35
Шлак ковш №11	3.3	5.51	16.76
Шлак ковш №3	3.03	5.43	16.36
Шлак ковш №14	7.97	5.74	6.44
Шлак ковш №23	8.1	5.85	6.96
Шлак ковш №32	8.63	5.8	6.82
Шлак ковш №5	2.69	6.03	8.36
Шлак ковш №30	2.26	6.15	13.70

По результатам опытных плавков сформулированы следующие рекомендации. При лавке ломов ВЦМ на стадии плавки установить, расход топлива близким к максимальному ( $500 \text{ нм}^3/\text{ч}$ ) при  $\alpha = 1.0$ . После подплавления всей партии металлосодержащей части шихты вести максимальную возгонку цинка. С этой целью необходимо задать  $\alpha = 0.9$  при прежнем расходе газа или загрузить коксик. Отгонку цинка осуществлять не менее 1 ч, наблюдая за динамикой процесса. Колбу вращать со скоростью 2-3 об/мин. После образования шлака (перед сливом первого ковша) необходимо выполнить экспресс-анализ и корректировать состав шлака в соответствии с номограммой, (Рисунок 5).

При обеднении шлаков после полного расплавления материала установить  $\alpha = 0.8 - 0.95$ . После экспресс анализа корректировать подачу флюсующих компонентов в соответствии с номограммой, (Рисунок 5). Основные выводы и рекомендации работы внедрены в производства с фактическим экономическим эффектом 213 тыс. руб. в год при ограниченном объеме переработки латунных ломов в связи с дефицитом вторичного сырья.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в работе результаты исследований свидетельствуют о комплексном влиянии цинка на процесс переработки медьсодержащих материалов, таких как шлаки и лома. Изучено влияние явления гетерогенизации шлакового расплава на показатели процесса плавки ломов и обеднения шлаков.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Исследован химический и фазовый состав шлаков ТРОФ и МЕРЦ. Показано, что максимальное содержание меди в шлаках от переработки латунных ломов ТРОФ-конвертера может достигать 48.67 %, в шлаках огневого рафинирования МЕРЦ - 13 %.

Основными шлакообразующими соединениями являются  $2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$ ,  $\text{ZnSiO}_3$ ,  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ .

2. Исследована вязкость синтетических шлаков, включающих основные шлакообразующие компоненты. Установлено, что богатый по ZnO шлак характеризуется наибольшим значением коэффициента динамической вязкости, что объясняется явлением гетерогенизации шлаков. Причем наиболее резкое изменение вязкости наблюдается в области температур 1230-1240 °С и далее монотно снижается до  $\eta < 1 \text{ Па}\cdot\text{с}$ .

Установлено, что при более низком содержании ZnO и в случаях бесцинковистых шлаков, при постоянной температуре, различия в коэффициентах динамической вязкости менее значимы, чем для шлаков содержащих более 20 мас. % ZnO.

По результатам экспериментов рассчитано эмпирическое значение величины энергии активации вязкого течения, которое максимально в случае гетерогенизации шлака и составляет 460 кДж/моль.

Высокая вязкость шлака обусловлена быстрой кристаллизацией расплава и выделением тугоплавких составляющих.

3. Проведено термодинамическое моделирование процесса совместной переработки шлаков печи МЕРЦ и шлаков от плавки латунных ломов в ТРОФ-конвертере. При этом определена последовательность восстановления цинка из шлакового расплава. Показана стадийность процесса восстановления соединений цинка. Отмечено, что исходя из величин изменений свободной энергии Гиббса реакции 3.4.9, прямое восстановление оксида цинка металлическим железом возможно, но маловероятно. Показано, что обязательным условием для отгонки цинка из шлака является присутствие газообразных восстановителей. Отгонка цинка затрудняется нахождением его в виде  $ZnO \cdot Al_2O_3$ , разрушить данное соединение можно только с помощью газовых восстановителей. Определены оптимальные параметры обесцинкования смеси шлаков ТРОФ и МЕРЦ:  $M_{Fe}$  15 %,  $M_{CaO}$  4 %, температура 1250 °С,  $\alpha = 0.95$ .

4. Исследована кинетика отгонки цинка из шлаков. Показано, что в области низких концентраций ZnO ~ 15 мас. %, т.е. до гетерогенизации расплава скорость процесса лимитируется кинетикой восстановления с эмпирической энергией активации, равной 21.5 кДж/моль. Отмечается смена порядка процесса с 0.3 до 1.2, что может объясняться изменением вязкости расплава.

5. Проведен анализ диффузионно-кинетических закономерностей процесса в области концентраций ZnO характерных для гетерогенного расплава (31 %). Определен эмпирический порядок по ZnO. Установлено, что в области температур от 1200 – 1280 °С величина порядка близка к единице и составляет 0.9-1.2. Дополнительно показана применимость уравнения Павлюченко для описания процесса в диффузионном режиме. Отмеченные обстоятельства позволяют предполагать, что скорость процесса лимитируется диффузией в гетерогенном расплаве.

6. На основании холодного моделирования выявлены основные потоки и определены скорости движения расплава в ТРОФ-конвертере, изменяющиеся в диапазоне 0.05 - 0.365 м/с. С учетом концентрации ZnO в расплаве и расчетной величины константы массоотдачи диффузионный поток на поверхность восстановителя принимает значения от  $(12-15) \cdot 10^{-4}$  при турбулентном режиме течения расплава, до  $6.66 \cdot 10^{-4}$  моль/с·м<sup>2</sup> при ламинарном режиме.

7. Сопоставление величин диффузионного потока на поверхность восстановителя и скоростей восстановления с отгонкой цинка позволяет утверждать, что процесс развивается в диффузионном режиме при достижении гетерогенизации расплава и его скорость лимитируется массоотдачей ZnO к поверхности металлического железа

8. Исследовано методом видеофиксации движение расплава в ванне промышленного агрегата. Подтверждена адекватность результатов опытов по холодному моделированию.

9. Предложена математическая модель, включающая в себя материальный и тепловой балансы плавки в ТРОФ-конвертере смеси шлаков от плавки латунного лома и от рафинирования черновой меди.

Расчетным путем определена доля тепловых эффектов реакций в тепловом балансе переработки смеси шлаков.

Количественно определены статьи потерь тепла.

10. Проведены промышленные испытания технологии обеднения медьсодержащих шлаков в ТРОФ-конвертере. Показана возможность снижения содержания меди в шлаке с 9.05 – 9.25 мас. % до 2.92 – 2.83 мас. % за счет обесцинкования шлака. Сформулированы рекомендации по оптимальному режиму обеднения шлака. Стадию плавления лома вести с расходом топлива близкому к максимальному 220 – 250 м<sup>3</sup>/ч при  $\alpha=1.0$ . После подплавления всей партии металлсодержащей шихты установить  $\alpha=0.9$  при прежнем расходе газа. Отгонку цинка осуществлять не менее 60 минут при скорости вращения колбы 2-3 об/мин. Отстаивание расплава производить при максимальном расходе топлива и  $\alpha=1.0$  не менее 40 минут без вращения колбы.

Шлак печи МЕРЦ шихтовать флюсами, %: Fe 14-16, SiO<sub>2</sub> 2-4, CaO 0.8-1, по отношению к массе шлака. Целесообразно состав шлака контролировать экспресс-анализом и в соответствии с номограммой корректировать подачу флюсующих компонентов до достижения оптимальной концентрации, % SiO<sub>2</sub> 33, CaO 12.6 Fe 21.4.

Результаты работы внедрены в практику ЗАО «НМЗ» с фактическим экономическим эффектом, подтвержденным актом внедрения.

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

1. Учитывая необходимость вывода цинка, перешедшего в газовую фазу из реакционной зоны, при оптимизации процесса в дальнейшем следует учесть необходимость отвода газообразных продуктов с использованием газов-носителей.
2. Представляет интерес изучение функции железа как переносчика кислорода в расплаве.

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

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

1. Меньщиков В.А. 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.).

2. Меньщиков В.А. Study of the 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. / 0.10 п.л.)

3. Меньщиков В.А. Features of the Thermal Performance of the TROF Converter // V.A. Men`shchikov, Ageev, N.G.a, Kolmachikhin, B.V., Venziga, Y.N. // Metallurgist. – 2017. - №61. – С.597-601 (0,28 п.л. / 0,16 п.л.)

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

4. Меньщиков В.А. 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.).

5. Меньщиков В.А. Исследование механизма переработки шлаков и медьсодержащих материалов в ТРОФ-конвертере / В.А. Меньщиков, Н.Г. Агеев // Тезисы докладов III Международной молодежной научной конференции «Физика. Технологии. Инновации. ФТИ-2016». – Екатеринбург: УрФУ, 2016. – С. 405-407 (0,1 п.л. / 0,05 п.л.).

6. Меньщиков В.А. Особенности переработки латунных ломов в ТРОФ-конвертере / В.А. Меньщиков, Н.Г. Агеев // Материалы Международной конференции «Ресурсосбережение и охрана окружающей среды при обогащении и переработке минерального сырья» (Плаксинские чтения 2016). – Москва: АО «Издательский дом «Руда и металлы», 2016. – С.С. 549-550 (0,07 п.л. / 0,04 п.л.).

7. Меньщиков В.А. Особенности переработки шлаков от плавки латунных ломов / В.А. Меньщиков, Агеев Н.Г. Е.А. Рыжкова // «Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья» (Плаксинские чтения – 2017). – Иркутск, Полиграфический центр «РИЭЛ», 2017. – С. 417-418 (0,1 п.л. / 0,04 п.л.).