

## ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук Рябова Георгия Александровича  
на диссертацию

**Шолоховой Светланы Анатольевны**

«Кинетика окисления сульфидного цинкового концентрата применительно к  
обжиговым печам кипящего слоя»,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по  
специальности 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

**Актуальность работы** определяется необходимостью повышения эффективности работы печей для обжига цинкового концентрата. В настоящее время рынок сульфидного цинкового концентрата динамично развивается. Процесс обжига концентрата проводится в печах кипящего слоя (КС) с обогащением воздушного дутья кислородом до 28-42 %. Для обеспечения эффективной работы таких печей требуется моделирование процесса горения частиц шихты, в частности, необходимы данные по кинетике химического реагирования. Кинетические характеристики сульфидного цинкового концентрата могут быть применены также для моделирования переходных процессов в печи КС и получения зависимости температуры и концентрации горючих веществ в слое от расхода шихты. Важным является поддержание температуры слоя в заданных пределах при изменении физических и химических свойств шихты для обеспечения устойчивой работы обжиговой печи. Поэтому тематика и результаты диссертационной работы являются, безусловно, актуальными.

### **Цель и сильные стороны работы**

Основной целью диссертационной работы является совершенствование процесса обжига концентрата в печи КС и управления этим процессом на основе исследования окисления сульфидного цинкового концентрата с определением кинетических характеристик шихты, использования этих характеристик для разработки моделей газообразования и переходных процессов в печи КС.

Сильной стороной диссертационной работы является глубокие исследования процессов кинетических характеристик в сочетании их применения к вопросам регулирования печей с КС для обжига шихты. Получены новые экспериментальные данные по кинетике окисления цинкового концентрата и основных его компонентов (сфалерита и пирита) при различных температурах и фракционных составах. На основе математической модели газообразования в кипящем слое получена зависимость удельного расхода обжигаемой шихты от основных технологических параметров процесса обжига: температуры, концентрации кислорода, скорости дутья. Разработанная математическая модель переходных процессов в печи КС для обжига цинковых концентратов позволяет рассчитать изменение температуры слоя и концентрации горючих веществ в нем при изменении расхода шихты.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

— получены новые экспериментальные данные и кинетические характеристики с учетом внутрипористого реагирования мелкодисперсных частиц сульфидного цинкового концентрата, а также чистых веществ – сфалерита и пирита.

Вх. №05 - 19/1 - 241  
от 28.09.20г.

— показано, что при среднем размере частиц менее 0,5 мм и равнодоступности кислорода в слое скорость реакции окисления шихты, сфалерита и пирита является функцией температуры (только в рабочем диапазоне) и не зависит от диаметра частиц.

**Степень обоснованности научных положений.** Научные положения, выносимые на защиту, в полной мере раскрыты в диссертации, автореферате и опубликованных работах.

**Достоверность основных положений и выводов,** полученных в диссертации, подтверждается корректной постановкой задач, использованием апробированных методик экспериментов и расчетов, а также сравнением результатов численного анализа с экспериментальными и расчётными данными, в том числе представленными в литературных источниках.

**Практическое значение** диссертационной работы заключается в следующем:

- предложенные математические модели газообразования в кипящем слое и переходных процессов в печи КС могут повысить эффективность работы обжиговой печи;
- разработанный алгоритм регулятора температуры кипящего слоя обеспечит устойчивую работу обжиговой печи.

#### **Апробация работы**

Материалы, отражающие содержание диссертационной работы, представлены в 13 печатных работах, в том числе 2 статьи в журнале из перечня ВАК при Минобрнауки России и 1 статья в журнале, входящем в реферативную базу данных Scopus. Апробация материалов осуществлялась достаточно широко на семинарах, форумах, университетских, всероссийских и международных конференциях. Публикации в должной мере отражают содержание работы.

#### **Структура, объём и основное содержание работы**

Диссертация Шолоховой Светланы Анатольевны состоит из введения, четырех глав, заключения, перечня условных обозначений, списка литературы и двух приложений. Весь материал изложен на 145 страницах, включая 44 рисунка и 14 таблиц. Список литературы содержит 121 наименование.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, разработанность в России и мире, сформулированы цель исследования, обоснована научная новизна и практическая ценность работы.

**Первая глава** посвящена аналитическому обзору существующих проблем работы печей с КС для обжига сульфидного цинкового концентрата. Рассмотрены условия устойчивой работы обжиговых печей, работающих в узком диапазоне химических и физических свойств шихты. Показано влияние температуры на процесс окисления цинкового концентрата и его составляющих и важность знания кинетических характеристик, на основе которых можно разработать полезные математические модели. Обосновано применение регулятора температуры кипящего слоя, снижающего вероятность недожога шихты и шлакования слоя. На основе обзора предложены



направления исследований.

Во **второй главе** определены основные характеристики процесса обжига цинкового концентрата, такие как теплота сгорания, плотность, порозность, содержание горючих веществ в слое, химический и дисперсный составы по данным, предоставленным ПАО «ЧЦЗ». По рассчитанным значениям скорости начала псевдооживления частиц и скорости их витания (выноса из слоя) определены диаметры уносимых частиц и частиц, которые надежно псевдооживаются. При скорости 0,7 м/с диаметр начала оживления для шихты составил  $\delta_o = 1323$  мкм, для огарка – 1166 мкм; диаметр витания для шихты составил  $\delta_v = 134$  мкм, для огарка – 119 мкм. По результатам расстановок получена полная зерновая характеристика для исходной шихты, приводятся математическое описание пофракционного распада частиц шихты и расчетные данные по доле уноса частиц слоя в пересчете на исходную массу шихты.

В **третьей главе** приведены данные по конструкции и условиям моделирования и работы лабораторной установки для проведения экспериментов по обжигу цинкового концентрата и основных его компонентов – сфалерита и пирита. Приведены результаты экспериментов, на основе которых после математической обработки определены кинетические характеристики окисления шихты, сфалерита и пирита. Приведена математическая модель газообразования в кипящем слое, разработанная соискателем. Анализируется корректность результатов, полученных в ходе экспериментального моделирования, и корректность кинетических характеристик в целом.

В **четвертой главе** приведена методика разработки математической модели переходных процессов в печи КС для обжига цинковых концентратов, позволяющая рассчитать изменение температуры слоя и концентрации горючих веществ в нем при изменении расхода загружаемой в печь шихты, полученные результаты соотнесены с экспериментальными данными. Также определена чувствительность основных характеристик модели на изменение входных режимных параметров системы. На основании полученных расчетных и экспериментальных динамических характеристик объекта (печи) разработан алгоритм регулятора температуры кипящего слоя и выбраны его настройки. Выполнено сравнение полученных по математической модели результатов с экспериментальными данными. Представлена функциональная схема регулятора температуры кипящего слоя.

В **выводах** сформулированы основные результаты работы.

Содержание автореферата в сжатом виде полностью отражает основное содержание диссертации.

#### **Соответствие тематики и содержания работы выбранной специальности**

Тема диссертации и результаты исследований соответствуют паспорту научной специальности 05.14.04 — Промышленная теплоэнергетика:

п.1. Разработка научных основ сбережения энергетических ресурсов в промышленных теплоэнергетических устройствах и использующих тепло системах и установках;

п.3. Теоретические и экспериментальные исследования процессов тепло- и массопереноса в тепловых системах и установках, использующих тепло.

Совершенствование методов расчета тепловых сетей и установок с целью улучшения их технико-экономических характеристик, экономии энергетических ресурсов.

### **Личный вклад автора**

Личный вклад автора заключается в постановке целей и задач исследований, проведении экспериментальных исследований, выполнении всех необходимых расчетов, разработке математических моделей, обобщении результатов экспериментальных и численных исследований, разработке рекомендаций по использованию результатов.

### **Замечания и вопросы по диссертации**

1. При расчете уноса необходимо было бы указать, как определяется расход продуктов сгорания, следовало бы также указать, какой диаметр частиц используется – по поверхности или с учетом коэффициента формы.
2. Предложенный подход к определению уноса возможен, но является упрощенным, реально унос из КС связан с разрывом пузырей, возможно образование кластеров, их распад. При этом время пребывания мелких частиц больше транспортного.
3. Следовало бы провести более подробные эксперименты с фракцией 0-100 мкм, ее очень много, а средний размер исходной шихты по массе 41 мкм.
4. Название рис. 3.5, 3.6 не вполне корректно. Правильнее было бы формулировать название как ...при нагреве до 900 °С. На стр. 49 указывается на «незначительное снижение массы» – это снижение на 6 %, тогда как снижение массы при подаче воздуха 13 % – всего лишь в 2 раза!
5. Из рисунка 3.19 следует, что частицы после обжига совершенно другие – нет относительно крупных кусков. Почему же Вы делаете вывод об одинаково развитой поверхности?
6. Следовало бы дать пояснения причинам самой низкой энергии активации по сравнению с другими работами. Было бы интересно также рассмотреть данные по предэкспоненциальному множителю.
7. Мне кажется, что возмущение слишком слабое, а фиксация через 2,5 минут редкая (стр. 87). Обычно в динамических опытах делаем наброс на 10% и более. Из рисунка 4.5 следует, что новое стабильное состояние не достигнуто – очевидно, что вы рано начали увеличивать расход. Непонятно, почему на этом рисунке расчетная кривая по формуле 4.10 не такая, как на рис. 4.1, на котором режим переходит в стабильный?

Отмеченные замечания не снижают высокий уровень работы.

### **Заключение**

Диссертация Шолоховой С.А. является завершенной научно-квалификационной работой, в которой определены кинетические характеристики окисления сульфидного цинкового концентрата, полученные данные применены для разработки математических моделей и регулятора температуры в печи кипящего слоя. Самостоятельно полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Диссертация обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения,

выдвигаемые для публичной защиты, свидетельствует о личном вкладе автора в науку. Основные идеи работы в полной мере отражены в автореферате и публикациях автора. Работа полностью соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Шолохова Светлана Анатольевна, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика.

Официальный оппонент

Заведующий лабораторией  
специальных котлов отделения  
парогенераторов и топочных  
устройств электростанций, д.т.н.,  
старший научный сотрудник

Рябов Георгий Александрович

«14» сентября 2020 г.

Почтовый адрес:

Открытое акционерное общество «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени теплотехнический научно-исследовательский институт» (ОАО «ВТИ»),  
115280, г. Москва, ул. Автозаводская, д. 14,  
Тел.: 8 (495) 234-76-30; 8 (495) 234-76-17,  
E-mail: [vti@vti.ru](mailto:vti@vti.ru)  
Сайт: <http://vti.ru>

Подпись Рябова Г.А. удостоверяю:

Руководитель отдела  
по управлению персоналом



Картошкина Ирина Анатольевна