

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
Уральский энергетический институт
Кафедра «Теплоэнергетика и теплотехника»

На правах рукописи

Шолохова Светлана Анатольевна



**КИНЕТИКА ОКИСЛЕНИЯ
СУЛЬФИДНОГО ЦИНКОВОГО КОНЦЕНТРАТА
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ОБЖИГОВЫМ ПЕЧАМ КИПЯЩЕГО СЛОЯ**

Специальность 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Владимир Александрович Мунц

Екатеринбург - 2020

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР	12
1.1. Виды печей для обжига сульфидных цинковых концентратов	12
1.2. Технология обжига шихты в печи кипящего слоя	13
1.3. Кинетика окисления сульфидного цинкового концентрата	17
1.3.1. Состав шихты и основные реакции, протекающие при обжиге	17
1.3.2. Влияние температуры на процесс обжига шихты	18
1.3.3. Методы определения кинетических данных	20
1.3.4. Результаты исследований кинетики окисления сульфидных цинковых концентратов	24
1.4. Автоматизация процесса обжига шихты в печи КС	27
1.5. Выводы по главе 1	32
ГЛАВА 2. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА ОБЖИГА	33
2.1. Теплота сгорания и элементарный состав шихты	33
2.1.1. Экспериментальные данные	33
2.1.2. Расчетные данные	33
2.2. Содержание горючих в слое	36
2.3. Плотность шихты и огарка	36
2.1.3. Справочные данные	36
2.1.4. Экспериментальные данные	37
2.4. Дисперсный состав шихты и огарка	37
2.1.5. Ситовый анализ шихты и огарка	37
2.1.6. Гранулометрический состав цинкового концентрата	39
2.1.7. Расчет доли уноса	42

2.5. Выводы по главе 2	45
ГЛАВА 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ КОНСТАНТ ОКИСЛЕНИЯ .	46
3.1. Лабораторная установка и методика проведения экспериментов	46
3.2. Определение кинетических характеристик окисления сульфида цинка .	49
3.3. Определение кинетических характеристик окисления сульфида железа	56
3.4. Определение кинетических характеристик цинкового концентрата	60
3.5. Обобщение полученных экспериментальных и расчетных данных	69
3.6. Газообразование в кипящем слое при обжиге цинкового концентрата...	71
3.7. Выводы по главе 3	75
ГЛАВА 4. ВЛИЯНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЖИГА НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ	76
4.1. Моделирование переходных процессов в кипящем слое	76
4.2. Анализ чувствительности характеристик модели.....	82
4.3. Экспериментальное определение динамических характеристик обжиговой печи	84
4.4. Сравнение экспериментальных и расчетных данных	89
4.5. Разработка регулятора и выбор его настроек.....	90
4.6. Выводы по главе 4	96
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	97
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	98
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	101
ПРИЛОЖЕНИЕ А	113
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	114

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Цветные металлы – цинк, алюминий, медь и другие – получили широкое распространение в промышленности. Интенсивность использования цинка не только в России, но и в мире, постоянно растет. Поэтому решение задач по увеличению эффективности существующих технологий получения данного металла является, несомненно, актуальным.

В настоящее время самым распространенным способом получения цинка является гидрометаллургический, который включает в себя такой ключевой этап как обжиг сульфидного цинкового концентрата (шихты) в кипящем слое для получения продуктов обжига с заданными параметрами для более полного извлечения цинка. Состав шихты составляют концентраты различных месторождений, а также вторичные цинксодержащие продукты. Обжиг материала проводится с целью максимального перевода из сульфидной формы в оксидную различных полезных металлов, преимущественно цинка, для дальнейшего их полного извлечения из продуктов обжига (огарка).

Крупнейшим производителем металлического цинка в России является ПАО «Челябинский цинковый завод» (ПАО «ЧЦЗ»), его производственные мощности составляют до 200 000 т/год по конечному продукту. Процесс обжига концентрата проводится в печах кипящего слоя с обогащением воздушного дутья кислородом до 28-42 %.

С целью повышения эффективности энергоустановок, в частности печей для обжига цинкового концентрата, требуется моделирование процесса горения частиц шихты в инструментах прогнозирования горения. Для этого необходимы данные по кинетике, а именно эффективная константа скорости химического реагирования, энергия активации и предэкспоненциальный множитель. Полученные кинетические характеристики сульфидного цинкового концентрата могут быть применены, например, для моделирования переходных процессов в печи кипящего слоя – получения зависимости температуры и концентрации

горючих веществ в слое от расхода шихты; моделирования процесса газообразования и т.д.

Также с целью повышения эффективности и обеспечения устойчивой работы обжиговых печей целесообразна разработка и внедрение на ПАО «ЧЦЗ» регулятора температуры кипящего слоя, поскольку ввиду изменения в узком диапазоне химических и физических свойств шихты температура обжига, обычно задаваемая в пределах 900-980 °С, постоянно изменяется, что требует вмешательства в процесс оператора. Это позволит обеспечить постоянное высокое качество продуктов обжига, снизить вероятность шлакования слоя и исключить недожог шихты.

Степень разработанности темы исследования

Обжиг сульфидного цинкового концентрата как этап получения цинка достаточно хорошо изучен. В литературе описаны технология обжига и физико-химические процессы, протекающие при окислении концентратов в печах с кипящим слоем. Кинетика окисления природного сфалерита и других сульфидных концентратов изучалась во многих работах – в основном, в плотном слое (ТГА, ДТА) [1-6] и кипящем слое [7-12], однако данные по энергии активации имеют огромный разброс значений (от нескольких единиц до нескольких сотен кДж/моль). Данный разброс обусловлен предположительно различными условиями проведения экспериментов, химическим и гранулометрическим составом шихты, а самое главное – методом обработки экспериментальных данных. В основном, при использовании метода термогравиметрического анализа нагрев образцов проводился в неизотермическом режиме с постоянной скоростью нагрева. Обработка экспериментальных данных всех авторов производилась с использованием различных моделей и безмодельных методов.

Цели работы

1. Исследование процесса окисления сульфидного цинкового концентрата методом термогравиметрического анализа (ТГА), использование

полученных экспериментальных данных для определения кинетических характеристик шихты.

2. Применение изученной кинетики окисления цинкового концентрата для разработки моделей газообразования и переходных процессов в печи кипящего слоя.

3. Изучение переходных процессов при обжиге шихты в печи кипящего слоя для дальнейшей разработки автоматической системы регулирования температуры кипящего слоя.

Задачи исследования

1. Определить основные характеристики исходной шихты и огарка: химический состав, теплоту сгорания, плотность, порозность, содержание горючих в слое, дисперсный состав.

2. Изучить кинетику окисления цинкового концентрата и основных его компонентов – сфалерита и пирита – при различных температурах и фракционных составах методом ТГА в изотермическом режиме, а именно, определить кинетические характеристики – константу скорости химического реагирования, энергию активации и предэкспоненциальный множитель.

3. На основе математической модели газообразования в кипящем слое с учетом полученных кинетических характеристик окисления шихты получить зависимость удельного расхода обжигаемой шихты от основных технологических параметров процесса обжига: температуры, концентрации кислорода, скорости дутья.

4. Используя полученные данные по кинетике окисления шихты, разработать математическую модель переходных процессов в печи кипящего слоя для обжига цинковых концентратов, позволяющую рассчитать изменение температуры слоя и концентрации горючих веществ в нем при изменении расхода шихты, а также определить чувствительность основных характеристик модели на изменение входных режимных параметров системы.

5. Разработать алгоритм регулятора температуры кипящего слоя, а также с помощью приближенной модели печи кипящего слоя определить настройки регулятора для возможного его внедрения на ПАО «ЧЦЗ».

Научная новизна и теоретическая значимость работы

1. Получены кинетические характеристики с учетом внутрипористого реагирования мелкодисперсных частиц сульфидного цинкового концентрата, а также чистых веществ – сфалерита и пирита.

2. 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.

Практическая значимость работы

1. Предложена математическая модель газообразования в кипящем слое, которая достаточно хорошо описывает зависимость удельной массовой концентрации горючих в слое от расхода шихты и концентрации кислорода в дутье.

2. Разработана математическая модель переходных процессов в печи кипящего слоя для обжига цинковых концентратов, позволяющая рассчитать изменение температуры слоя и концентрации горючих веществ в нем при изменении расхода шихты, а также определена чувствительность основных характеристик модели на изменение входных режимных параметров системы.

3. На основании обобщения теоретических и экспериментальных данных разработан алгоритм регулятора температуры кипящего слоя и выбраны его настройки методом численного моделирования.

Методология и методы диссертационного исследования

В диссертации использованы основные теоретические положения тепло-массообмена, физической химии, уравнения материального и теплового баланса. Численное моделирование выполнено средствами программы Microsoft Excel. Разработка модели печи кипящего слоя и алгоритма регулятора температуры

проводилась в графической среде имитационного моделирования Matlab Simulink и программно-техническом комплексе (ПТК) «Овация». Верификация разработанных математических моделей выполнена на основании полученных результатов экспериментальных исследований на приборе синхронного термического анализа NETZSCH STA 449 F3, совмещенного с масс-спектрометрической системой QMS 403C, и на основании данных работающих печей кипящего слоя при проведении промышленных испытаний.

Положения, выносимые на защиту:

1. Особенности окисления мелкодисперсных частиц шихты в кипящем слое с учетом внутрипористого реагирования.
2. Влияние температуры обжига цинкового концентрата на скорость химического реагирования.
3. Влияние изменения расхода шихты и концентрации кислорода в дутье на содержание горючих в слое.
4. Методика расчета изменения температуры слоя и концентрации горючих веществ в нем при изменении расхода загружаемой в печь шихты.
5. Алгоритм регулятора температуры печи кипящего слоя и выбор его настроек.

Личное участие 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.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов обеспечивается применением современного оборудования с высокой точностью измерений, воспроизводимостью результатов экспериментов. Основные результаты исследований, приведенные в диссертации, докладывались на: Всероссийской научно-практической конференции студентов,

аспирантов и молодых ученых с международным участием, 17–20 декабря 2013 г., Екатеринбург; 14-ой Всероссийской научно-практической конференции «Энергетики и металлурги настоящему и будущему России», 21-23 мая 2013 г., Магнитогорск; конференции с международным участием «VIII Всероссийский семинар ВУЗов по теплофизике и теплоэнергетике», 12-14 ноября 2013 г., Екатеринбург; VII Международной научно-практической конференции на тему «Актуальные вопросы науки, технологии и производства», 20-21 марта 2015 г., Санкт-Петербург; 16-ой Всероссийской научно-практической конференции «Энергетики и металлурги настоящему и будущему России», 19-21 мая 2015 г., Магнитогорск; международной конференции «IX Семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике», 21-24 октября 2015 г., Казань; IX Всероссийской конференции с международным участием «Горение топлива: Теория, эксперимент», 16 –18 ноября 2015 г., Новосибирск; Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии», 15-18 декабря 2015 г., Екатеринбург; Международной научно-практической конференции «Энерго– и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» – Даниловские чтения, 11–15 декабря 2017 г., Екатеринбург.

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в 13 печатных работах, в том числе 2 статьи – в журналах, включенных в перечень ВАК, и 1 статья – в журнале, входящем в международную базу цитирования Scopus.

Обоснование соответствия диссертации паспорту научной специальности 05.14.04 – «Промышленная теплоэнергетика»

Пункт 3. (из паспорта специальности). 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.

Пункт 5. (из паспорта специальности). Оптимизация параметров тепловых технологических процессов и разработка оптимальных схем установок, использующих тепло, с целью экономии энергетических ресурсов и улучшения качества продукции в технологических процессах.

В рамках диссертационной работы проводились исследования процессов массообмена при обжиге шихты, содержащей горючие компоненты, а также оптимизация параметров технологических процессов в печах с кипящим слоем и разработка и настройка алгоритма регулятора температуры кипящего слоя с целью улучшения качества конечного продукта.

Структура и объём диссертации

Диссертация 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.

Благодарности

Автор выражает свою искреннюю признательность и благодарность Мунцу Владимиру Александровичу, профессору, доктору технических наук и заведующему кафедрой «Теплоэнергетика и Теплотехника», за помощь в работе над исследованиями.

Автор также выражает благодарность Терентьеву Владимиру Михайловичу, ведущему инженеру-технологу Инженерного центра ПАО «Челябинский цинковый завод» за содействие в выполнении экспериментальных исследований на промышленных печах кипящего слоя, а также за предоставление необходимых для выполнения исследования исходных данных.

Отдельная благодарность коллективу кафедры «Тепловые электрические станции», Осипову Павлу Валентиновичу, Худяковой Галине Ивановне, Никитину Александру Дмитриевичу за помощь в выполнении экспериментов с шихтой и основными ее компонентами.

Огромная благодарность коллективу кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника», в особенности Тупоногову Владимиру Геннадьевичу, Голдобину Юрию Матвеевичу, Гальперину Леониду Гдалевичу, Павлюк Елене Юрьевне, Черепановой Екатерине Владимировне, Лумми Адольфу Павловичу за неоценимую поддержку в работе над исследованиями.

ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Одним из ключевых этапов при производстве элементарного цинка является получение его оксидной формы путем обжига в печи шихты [13].

Шихта – это смесь из сульфидных цинковых концентратов различных месторождений, которая загружается в обжиговую печь для получения продуктов обжига с заданными химическими свойствами и составом [14]. Шихта содержит помимо цинковых концентратов оборотные материалы (пыль, огарок), вторичное цинксодержащее сырье, а также шламы очистных сооружений.

Цель обжига концентрата заключается в наиболее полном и быстром переводе сульфидов металлов в их оксидную форму, а также максимальный перевод серы из сульфидов металлов в диоксид серы с целью дальнейшего производства серной кислоты [15,16].

1.1. Виды печей для обжига сульфидных цинковых концентратов

Первоначально обжиг концентратов производился в печах с внешним подводом тепла и механическим перемешиванием материала на поду печи [15]. Данный способ обжига занимал достаточно долгое время, вместе с тем имел большие потери тепла и занимаемые печами площади. В связи с этим начали переходить на обжиг в многоподовых обжиговых печах, которые имели свои недостатки, а главное – низкую производительность [17].

Следующим этапом развития процесса обжига сульфидных материалов является обжиг во взвешанном состоянии [18]. Принцип работы заключается в том, что предварительно высушенный и подогретый до 800 °С концентрат подается вместе с воздухом через горелку в печь, где он сгорает в виде факела. При таком обжиге обеспечивается более тесный контакт молекул кислорода с частицами концентрата. Недостатком данных печей являются высокие требования к содержанию влаги в концентратах, а также к их гранулометрическому составу [19,20].

Разработка печей с кипящим слоем (КС) позволила устранить недостатки

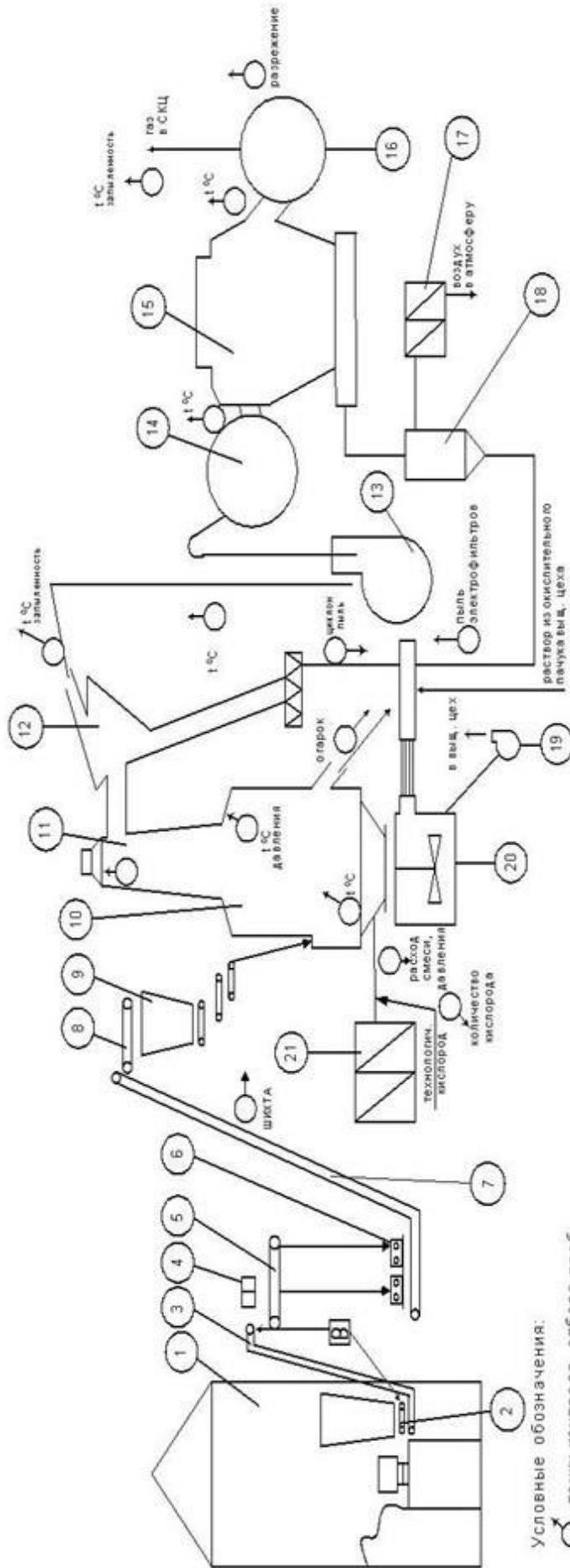
предыдущих печей и поднять уровень обжига [21-23]. Также преимуществом данного способа обжига стала высокая производительность, простота конструкции, возможность дополнительного получения серной кислоты из обжиговых газов и автоматизации процесса [15,24,25].

Принцип работы печи основан на том, что при достижении определенной скорости воздуха, подаваемого снизу слоя, концентрат начинает «кипеть», принимает псевдоожженное состояние [23,26-30]. За счет этого увеличивается поверхность контакта частиц с молекулами кислорода, что способствует ускорению протекания окислительных реакций и тепломассообмена, а непрерывное перемешивание частиц концентрата позволяет поддерживать одинаковую температуру в объеме слоя и проводить процесс обжига достаточно быстро и в небольших рабочих объемах [31-34].

1.2. Технология обжига шихты в печи кипящего слоя

На рисунках 1.1 и 1.2 представлены технологическая схема процесса обжига цинковых концентратов и конструкция печи кипящего слоя №2 для обжига цинковых концентратов Челябинского цинкового завода.

Поступающие на склад завода цинковые концентраты с различным элементарным составом предварительно подсушиваются и дозируются в определенной пропорции в шихту. Поскольку основную долю концентратов составляют частицы с размерами нескольких микрометров, то с целью уменьшения пылевыноса из обжиговых печей производится увлажнение сухой шихты в пределах 9-15 % [35]. В ходе транспортировки и других различных манипуляций с концентратами образуются комки различного размера и плотности, которые в дальнейшем измельчаются в дисковых дробильных машинах. Необходимая крупность помола обеспечивается регулированием расстояния между дисками машины.



№ п/п	наименование	к-во	№ п/п	наименование	к-во	№ п/п	наименование	к-во
1	Склад концентратов		8	Транспортер ленточный	1	15	Электрофильтр ГК-30, ЭГТ, ГК-18	2, 1, 1
2	Питатель ленточный	2	9	Бункер над печью КС	10	16	Коллектор очищенного газа	1
3	Транспортер ленточный	1	10	Печь КС	5	17	Вакуум насос РМК-4, ВВН-50	2, 1
4	Магнит	1	11	Стояк охлаждаемый	6	18	Рукавный фильтр	3
5	Транспортер ленточный	1	12	Циклон СИОТ-12	10	19	Насос	11
6	Дисковая дробильная машина	2	13	Экстагстер Э-4	5	20	Мешалка	3
7	Транспортер ленточный	1	14	Коллектор грязного газа	1	21	Воздухонагреватель ТВ-300-1,6М-2	4

Рис. 1.1 – Технологическая схема обжига цинковых концентратов

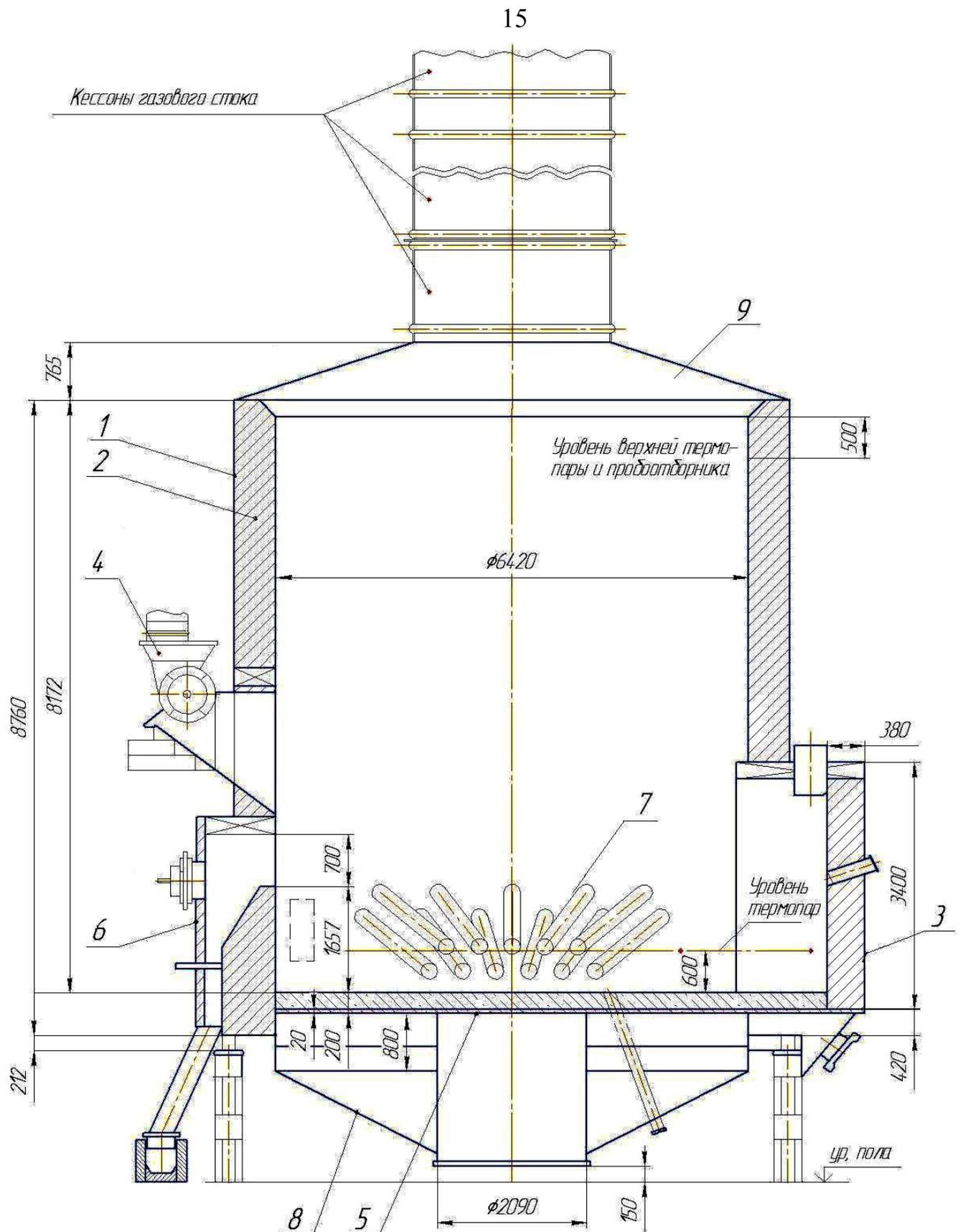


Рис. 1.2 – Печь КС №2 Челябинского цинкового завода

1 – стальной корпус; 2 – футеровка огнеупорным кирпичом; 3 – форкамера; 4 – роторный забрасыватель; 5 – воздухораспределительная подина; 6 – сливной порог; 7 – испарительные кессоны; 8 – воздушная камера; 9 – свод.

Системой транспортеров и питателей шихта подается в бункер над печью, а затем в кипящий слой. Концентрат может подаваться в печь двумя способами: через форкамеру, которая представляет собой загрузочную камеру, примыкающую к печи, или с помощью высокоскоростного роторного забрасывателя. Площадь пода вместе с форкамерой составляет около 34 м². При загрузке шихты через забрасыватель частицы рассеиваются над слоем по площади печи.

С целью повышения производительности печи используется обогащение кислородом до 28-42 % воздушного дутья [36,37]. Производительность каждой печи КС ПАО «ЧЦЗ» составляет до 430 т шихты в сутки. Технический кислород поступает по трубопроводам на установки смешения с воздухом отдельно на каждую печь. Через воздушную камеру, которая расположена под подиной, обогащенный кислородом воздух поступает в слой. Количество дутья определяется полнотой протекания реакций окисления концентрата.

Кипящий слой составляют частицы, размер которых больше диаметра витания при заданной скорости дутья [37]. Мелкодисперсные частицы с размерами меньше диаметра витания выносятся из кипящего слоя, успевая частично обгореть в надслоевом пространстве и газоходах, и улавливаются в циклоне и фильтрах. Ориентировочный процентный состав продуктов обжига на ПАО «ЧЦЗ» следующий: огарок – 30-40 %, циклонная пыль – 50-60 %, пыль электрофильтров – 5 %.

Обжиг концентратов проводится преимущественно в интервале температур 900-980 °С [38,39]. Выбор температуры во многом зависит от химического состава материала, который зачастую определяется из опыта переработки ранее поставляемых концентратов [40,41]. Заданная температура поддерживается и регулируется изменением расхода шихты, который регулируется дистанционно изменением скорости движения конвейерных лент питателей и величины открытия шиберов бункера. Контроль температуры осуществляется в пяти точках по периметру кипящего слоя, а также под сводом. Согласно источникам [42,43] практически все тепло (98,5-99 %) поступает от экзотермических реакций,

которое расходуется в следующем соотношении: 3 % – затраты на испарение влаги материала; 7 % – потери через обмуровку печи; 16 % – потери с огарком и пылью; 54 % – потери с уходящими газами. Около 20 % тепла является избыточным, поэтому для поддержания постоянной заданной температуры слоя его следует отводить. Отвод тепла осуществляется с помощью теплообменников – испарительных кессонов с естественной циркуляцией. Использование испарительного охлаждения кессонов позволяет полностью утилизировать избыточное тепло для дальнейшего производства промышленного пара.

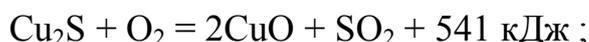
Практически всю массу кипящего слоя составляет огарок (95-97 %), находящийся в печи в среднем несколько часов (около 6 часов) [44,45], и только 3-5 % – частицы концентрата. Слой движется со скоростью 1,1-1,3 м/ч по поду печи от загрузочной камеры до сливного порога высотой 1,6 м, затем огарок поступает на выщелачивание – последующий этап получения цинка.

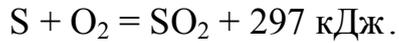
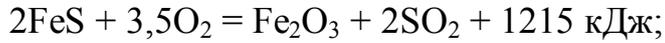
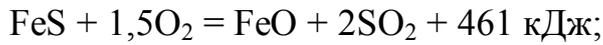
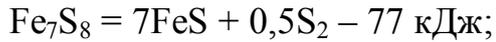
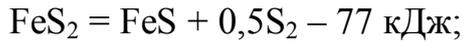
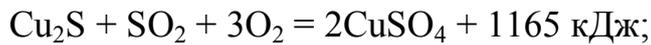
1.3. Кинетика окисления сульфидного цинкового концентрата

1.3.1. Состав шихты и основные реакции, протекающие при обжиге

В основу концентрата входят соединения цинка, а также других полезных металлов. Шихта имеет следующий элементный состав: цинк – 40-60; железо – 2,5-13; медь – 0,2-2,5; свинец – 0,2-3,5; кадмий – 0,1-0,5; сера – 30-35, прочие.

При обжиге сульфидов протекают в основном экзотермические реакции, наиболее характерные приведены ниже [17,46,47]:





Полезными продуктами обжига являются: огарок и пыль, улавливаемая электрофильтрами (оксиды металлов) [48], а также обжиговые газы (оксиды серы) [16].

Согласно справочным данным [43] при окислении одного килограмма цинковых концентратов выделяется до 4,7 МДж тепловой энергии.

1.3.2. Влияние температуры на процесс обжига шихты

Гидрометаллургический способ производства цинка требует получения огарка со следующими физико-химическими характеристиками: размер частиц не более 0,3 мм, минимальное содержание сульфидной серы, ферритов и силикатов цинка, заданное количество сульфатной серы (не более 3-4% для компенсации потерь серной кислоты в процессе производства) [17,42,49,50].

Интенсивность протекания окислительного процесса определяется температурой обжига, в том числе температурой воспламенения сульфидов [51,52].

Нижний предел температуры обжига шихты определяется температурой воспламенения входящих в ее состав сульфидов, которая зависит, главным образом, от размера частиц и его природы [53,54] (Таблица 1.1). Так, минимальные температуры воспламенения имеют халькопирит (CuFeS_2) и пирит (FeS_2): при размере частиц менее 0,05 мм воспламенение под воздействием воздуха начинается при 280 и 290 °С соответственно, при размере частиц 1-2 мм – 401 и 428 °С соответственно. В свою очередь, максимальные температуры воспламенения отмечаются у сфалерита (ZnS) и галенита (PbS): при размере частиц менее 0,05 мм воспламенение под воздействием воздуха начинается при

554 и 505 °С соответственно, при размере частиц 1-2 мм – 646 и 750 °С соответственно.

Таблица 1.1 – Температура воспламенения некоторых сульфидов металлов

Размер частиц, мм	CuFeS ₂ халькопирит	FeS ₂ пирит	Fe _{1-x} S	ZnS сфалерит	PbS галенит
0,0-0,05	280	290	330	554	505
0,05-0,075	335	345	419	605	697
0,075-0,10	357	405	444	623	710
0,10-0,15	364	422	460	637	720
0,15-0,20	375	423	465	644	730
0,20-0,30	380	424	471	646	730
0,30-0,50	385	426	475	646	735
0,50-1,0	395	426	480	646	740
1,0-2,0	401	428	482	646	750

В литературе [55] отмечается, что воспламенение цинкового концентрата начинает происходить при самой низкой из температур воспламенения его компонентов, что свидетельствует о стадийности окисления сульфидов в концентрате, при этом происходит окисление только тех сульфидов, у которых температура воспламенения находится ниже температурной границы обжига. Из этого следует, что для интенсивного ведения процесса обжига требуется нагрев материала до температуры выше максимальной температуры воспламенения из компонентов шихты.

Дальнейшее повышение температуры обжига концентрата при определенном времени нахождения шихты в печи приводит к увеличению скорости химического реагирования сульфидов [56].

Получившийся в процессе обжига огарок всегда содержит помимо оксида цинка сульфат и феррит [57,58].

При температуре 700 °С начинается диссоциация сульфата цинка при наличии оксидов железа, которая усиливается к 720 °С [59]. При более низких температурах 600-700 °С под воздействием сульфидов железа и цинка также возможно протекание реакции разложения сульфата цинка. Таким образом, для

того чтобы минимизировать количество сульфатов цинка в огарке необходимо поддерживать температуру обжига выше температуры диссоциации сульфатов.

Образование ферритов цинка препятствует извлечению элементарного цинка при выщелачивании, поскольку ферриты не растворяются под воздействием слабой серной кислоты [6,60]. Реакция образования метаферрита цинка – взаимодействие оксидов цинка и железа – начинается при температуре 600 °С и усиливается выше 650 °С [61]. Данное соединение легко разрушается под воздействием оксидов серы. Высокая концентрация диоксида серы в результате обжига шихты в кипящем слое позволяет получать продукты обжига с большим количеством водорастворимого цинка [49].

Выбор температуры обжига не ограничивается целью минимизации сульфатов и ферритов, также большую опасность представляет образование силикатов и спекание частиц огарка. Силикаты ($ZnSiO_3$, $PbSiO_3$) – легкоплавкие соединения – хоть и растворяются под воздействием серной кислоты, но образуют трудно фильтруемую пульпу. Применение обогащенного кислородом дутья позволяет получить огарок с содержанием силикатов и ферритов до двух раз меньше, чем при использовании воздушного дутья [62]. Спекание частиц огарка из мелких частиц в крупные агломераты начинается при температуре выше 1000 °С из-за образования жидкой фазы на поверхности частиц, которая препятствует диффузии кислорода внутрь частицы [63-65]. В связи с этим происходит значительное укрупнение огарка и нарушается аэродинамика кипящего слоя, что может привести к останову печи. Во избежание этого периодически производится удаление огарка с помощью устройства донной выгрузки.

1.3.3. Методы определения кинетических данных

Для расчета кинетических характеристик сульфидного цинкового концентрата используются различные методы и приборы, самые распространенные из них – термогравиметрический анализ (ТГА),

дифференциальный термогравиметрический анализ (ДТГ-анализ) и аппараты с кипящим слоем.

Преимуществом метода окисления в кипящем слое является отсутствие диффузионных ограничений, возможность контроля и расчета температуры реагирующих частиц. Недостатком – невозможность контролировать убыль массы напрямую, только по показаниям газоанализатора, из-за чего точность эксперимента зависит от чувствительности прибора. Данный недостаток исключается в методе ТГА – непрерывный учет убыли массы сочетается с показаниями газоанализатора.

Методика термического анализа заключается в непрерывном измерении физических и химических изменений испытуемого вещества при изменении температуры. Измеряемыми переменными, например, могут быть изменение массы, температуры, тепловые потоки из и внутрь материала. Самым распространенным является термогравиметрический метод, при котором небольшое количество тонко измельченного испытуемого вещества нагревается на микрометрических весах высокой чувствительности в определенной атмосфере либо изотермическим, либо неізотермическим способом с заданной скоростью изменения температуры. Изменение массы образца измеряется и фиксируется как функция температуры печи или времени. ТГА в основном используется для композитного анализа твердого топлива для определения температурных границ изменения массы и для изучения выгорания твердого топлива (в основном, углей).

Данные методы являются эмпирическими, поэтому все результаты зависят от условий испытаний и используемых приборов так же, как и от характеристик твердого топлива. Методы надежны и воспроизводимы.

Скорость реакции может быть выражена произведением трех независимых функций [66,67]:

$$\frac{dX}{d\tau} = K(T) \cdot f(X) \cdot f(P), \quad (1.1)$$

где $K(T)$ – функция температуры (константа скорости реакции), $f(X)$ – функция степени конверсии, $f(P)$ – функция парциального давления (концентрации)

газового реагента. Уравнение (1.1) описывает скорость одношагового процесса. Степень конверсии X определяется экспериментальным путем как доля общего изменения физического свойства, которое сопровождает процесс. Если процесс сопровождается потерей массы, степень конверсии оценивается как доля общей потери массы в процессе.

Температурная зависимость скорости процесса обычно выражается через уравнение Аррениуса:

$$k = k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T}\right), \text{ м/с,}$$

где k_0 – предэкспоненциальный множитель, м/с; E_a – энергия активации, кДж/кмоль; R – универсальная газовая постоянная, кДж/(кмоль·К).

Определенные экспериментально кинетические параметры целесообразно называть «эффективными» или «кажущимися», чтобы подчеркнуть тот факт, что они могут отклоняться от внутренних параметров определенного отдельного шага.

Зависимость скорости процесса от степени конверсии может быть выражена с помощью широкого спектра моделей реакций $f(X)$ [66]. Большинство из этих моделей относятся к реакциям с твердыми веществами. То есть они могут иметь очень ограниченную (если есть) применимость при интерпретации кинетики реакции, в которой не задействована какая-либо твердая фаза.

Кинетические составляющие определяются сначала выбором модели, а затем подгонкой ее к экспериментальным данным [66]. В результате значимая интерпретируемость определенных составляющих зависит от того, насколько выбранная модель реакции адекватно отражает основные особенности механизма процесса. Проблема выбора модели реакции заключается в том, что превосходное соответствие данных может быть достигнуто с помощью физически бессмысленного уравнения, такого как полиномиальная функция. Адекватность функции для представления механизма процесса – это вопрос знания и понимания механизма процесса.

Подгонка модели – это вывод кинетических параметров, связанных с конкретной моделью реакции, которая, как предполагается, представляет зависимость скорости реакции от конверсии. Существует много способов подбора моделей. Все они включают в себя минимизацию разницы между экспериментально измеренными и рассчитанными данными о скорости реакции. Данные могут быть изотермическими, данными с постоянной скоростью нагрева или их смесью.

Часто возникает вопрос, в каком режиме проводить эксперименты: изотермическом или неизотермическом с постоянной скоростью нагрева. Оба имеют свои преимущества и недостатки. Самый большой недостаток изотермических экспериментов – ограниченный диапазон температур. При более низких температурах очень трудно достичь полной конверсии в течение разумного периода времени. При более высоких температурах время нагрева становится сравнимым с характерным временем процесса, что означает, что значительная степень конверсии достигается до того, как изотермический режим включается. Затем следует учитывать ненулевую степень конверсии, достигнутую в течение периода неизотермического нагрева. Такие методы неизбежно страдают от вычислительных ошибок из-за ненулевой степени конверсии, достигнутой в течение неизотермического периода нагрева. Из преимуществ изотермического режима можно отметить практически постоянную скорость реакции на линейном участке кривой.

Проблему ненулевой конверсии легко избежать в экспериментах с постоянной скоростью нагрева, начиная нагревание с температуры, которая значительно ниже температуры, при которой процесс становится обнаруживаемым. Самый большой недостаток экспериментов с постоянной скоростью нагрева состоит в том, что труднее идентифицировать модели, на основании которых проводится обработка экспериментов. Также с ростом температуры одновременно изменяется скорость химической реакции и степень конверсии. А при высокой скорости нагрева невозможна фиксация изменения параметров [67].

1.3.4. Результаты исследований кинетики окисления сульфидных цинковых концентратов

Обжиг сульфидного цинкового концентрата как один из этапов получения цинка изучен достаточно хорошо. Кинетика окисления изучалась во многих работах, но полученные результаты по энергии активации сильно отличаются друг от друга предположительно из-за различных условий проведения экспериментов, химического и гранулометрического состава, а самое главное – метода обработки экспериментальных данных. В основном, изучалось окисление цинкового концентрата в плотном слое (ТГА, ДТА) [1-6] и кипящем слое [7-12].

В работе [5] изучалось окисление природного сфалерита методом ТГА на приборе STA 449C (NETZSCH). Эксперименты проводились в неизотермическом режиме с образцами массой 9,5 мг и размерами частиц менее 0,125 мм, нагрев до 1000 °С выполнялся при различных скоростях нагрева (5, 10 и 20 °С/мин) и различных концентрациях кислорода в дутье (от 20,8 до 8,4 % по кислороду). Как показали эксперименты, активное протекание реакции начинается при нагреве образца выше 700 °С. Снижение концентрации кислорода слабо влияет на изменение массы навески, происходит сдвиг кривых ТГ в сторону более высокой температуры. Уменьшение фракции сульфида цинка также не влияет на изменение массы, происходит сдвиг кривых ТГ в сторону более низких температур. Изучение морфологии частиц окисленного природного сфалерита показало, что их первоначальная структура не изменилась. Расчет кинетических параметров осуществлялся на основании безмодельного метода Киссинджера, основанный на использовании температур максимальных тепловых эффектов при различных скоростях нагрева в неизотермическом режиме. Получена энергия активации равная 296 кДж/моль. Согласно одношаговой модели Авраами-Ерофеева энергия активации составила 318 кДж/моль. В подобных условиях проводили эксперименты с низкосортным концентратом сульфида цинка [4] со скоростью нагрева 8 °С/мин в диапазоне температур от 725 до 800 °С в среде воздуха с массой образца около 500 мг. Энергия активации составила 193 кДж/моль.

Эксперименты с мелкодисперсным марматитом (железистым сфалеритом) массой 100 мг в установке ТГА дали следующие результаты. В неизотермических условиях при скорости нагрева $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ до $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ кажущаяся энергия активации для температурного интервала $750\text{-}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ составила от 69 до 86 кДж/моль в зависимости от метода обработки [3]. Также в работе была отмечена высокая пористость исходных частиц и огарка (более 30%), которая обеспечивает подачу окислителя к границе раздела ZnO/ZnS и удаление образовавшегося SO_2 . В изотермических условиях в температурном диапазоне $750\text{-}900\text{ }^{\circ}\text{C}$ получена энергия активации 96 кДж/моль [1]. По данным [2] для разных модификаций сфалерита значения энергии активации варьируются от 63 до 161 кДж/моль.

В работах [9,10,68,69] изучено влияние концентрации кислорода в дутье, температуры слоя и размера частиц в установке с кипящим слоем на степень конверсии. Увеличение концентрации кислорода в слое уменьшает время для полной конверсии концентрата. Степень конверсии быстро увеличивается с ростом температуры в диапазоне $610\text{-}960\text{ }^{\circ}\text{C}$ и с уменьшением размера частиц от 1 до 0,18 мм. Также было показано, что начальная масса не влияет на полученные результаты. Энергия активации составила 87 кДж/моль [9] и 169 кДж/моль [10]. Авторами [8] показано, что энергия активации зависит от количества добавленного инертного материала (оксида цинка) к сульфидному цинковому концентрату и показывает минимум 25 кДж/моль при 15 % в загрузочной смеси в реактор с кипящим слоем. Окисление сульфидного цинкового концентрата в печи кипящего слоя также проводились авторами [7,11], полученные значения энергии активации составили 25 и 222-314 кДж/моль.

Данные по энергии активации других сульфидных концентратов, которые имеют те же особенности кинетики и механизм окисления, например, медных, медно-никелевых и пирротина составляют соответственно 12,7-23,3 кДж/моль [70], 19-23 кДж/моль [71] и 71-189 кДж/моль [72].

Скорость химических реакций определяется молекулярными превращениями и диффузией кислорода в зону реакции частицы [73]. В статье

[74] проведено исследование кинетики окисления монолитных кристаллов сфалерита и марматита с размерами частиц 1-2 см в зависимости от температуры. Самая высокая скорость была отмечена в первые минуты. Далее образуется и растет плотная корка из оксидов, благодаря чему снижается скорость окисления сульфидов и ограничивается скоростью диффузионного процесса. Также проводились подобные эксперименты с частицами сульфидного цинкового концентрата – монолитными кристаллами и спеченными частицами, в итоге получены соотношения скорости окисления от типа и размера зерен. Для проведения опытов использовалась трубчатая печь, а процесс окисления проводился с воздушным дутьем. Согласно результатам экспериментов окисление монолитных кристаллов происходит медленнее по сравнению со спеченными частицами сульфидов при одинаковых размерах. Подтверждение тому есть в работе [75].

В работе [76] описывается математическая модель процесса окисления частиц цинкового концентрата с переменными параметрами, такими как температура, химический и фракционный составы, концентрация кислорода. Данная модель демонстрирует, что при температуре 960-980 °С достигается максимальная скорость химической реакции окисления шихты при условии необходимого содержания сульфидного, ферритного и оксидного цинка в продуктах обжига.

В упомянутых выше трудах выделяются основополагающие факторы, оказывающие воздействие на скорость химических реакций окисления, такие как температура, гранулометрический (в широком диапазоне) и химический составы материала, концентрация кислорода в зоне реакции, пористость частиц концентрата и продуктов обжига. Приводятся сравнительные характеристики степени конверсии от размера частиц и температуры обжига в широком диапазоне: от температуры воспламенения до температуры оплавления, от частиц размером в несколько десятков микрометров до нескольких сантиметров. В целом, с увеличением размера частиц в большом диапазоне скорость окисления падает за счет диффузии кислорода в объеме частицы, с уменьшением

температуры – скорость также падает. В промышленных условиях обжиг шихты производят в узком температурном диапазоне и размерами частиц менее 0,5 мм (причем более 80% концентрата имеют размер менее 0,1 мм).

1.4. Автоматизация процесса обжига шихты в печи КС

Процесс обжига цинкового концентрата в печи кипящего слоя протекает очень интенсивно ввиду тесного контакта частиц материала с кислородом, но также из-за огромной массы слоя обладает большой инерционностью, в связи с этим требуется непрерывный контроль основных параметров и автоматизация процесса для стабильной работы печи [77-79]. Основным из контролируемых параметров является температура кипящего слоя, также подвергаются мониторингу следующие измеряемые величины [80-81]:

- расход шихты на печь;
- расход воздуха на подину и форкамеру;
- расход и давление кислорода (концентрация кислорода на печь);
- давление воздуха под подиной;
- давление и температура газов под сводом печи, на входе и выходе пылеулавливающих устройств и перед эксгаустером;
- концентрация диоксида серы в газообразных продуктах обжига;
- уровень в барабане-сепараторе, температура и давление воды на входе и пароводяной смеси на выходе из теплообменника при утилизации избыточного тепла.

К типовой схеме автоматизации технологического процесса можно отнести следующие системы [82]:

- теплотехнический контроль (измерение) текущих значений параметров процесса, вывод их на видеокadres операторских станций;
- дистанционное управление исполнительными механизмами;

- технологическая сигнализация о состоянии оборудования, контроль отклонения за допустимые пределы основных технологических параметров;
- автоматическое непрерывное регулирование технологических процессов.

На отечественных и зарубежных цинковых заводах принципы АСУТП аналогичны представленным выше, отличаются только степенью автоматизации и программным обеспечением.

На Челябинском цинковом заводе автоматизированная система управления технологическими процессами организована на базе контроллера TSX Premium (процессорный модуль P57 3634M), среда разработки прикладного программного обеспечения UnityPro (для контроллера), InTouchWonderware (операторская станция). Данная система обеспечивает контроль основных технологических параметров, дистанционное управление механизмами и автоматическое поддержания уровня в барабане-сепараторе системы испарительного охлаждения печи. При отклонении уровня воды в барабане от среднего значения подается команда от регулятора на управляющую задвижку на трубопроводе питательной воды, уменьшая или увеличивая подачу воды в барабан.

Функция регулирования температуры кипящего слоя, как основного параметра процесса обжига, на ПАО «ЧЦЗ» не реализована. Оператор по показаниям процесса дистанционно вносит коррективы. Например, при снижении температуры в кипящем слое ниже заданной, он увеличивает подачу концентрата в печь путем увеличения частоты вращения электропривода ленточного транспортера (дискретное управление – больше/меньше) с видеокadra со своего рабочего места. Корректировка остальных процессов происходит по месту. Решение по тем или иным действиям оператор принимает самостоятельно, основываясь на своих знаниях и опыте работы.

Ввиду влияния таких факторов, как изменение химического и гранулометрического состава цинкового концентрата в узких пределах и большой инерционности слоя из-за его огромной массы, ручное регулирование температуры (изменением частоты вращения электропривода ленточного

транспортера) требует постоянного контроля оператором и является очень неудобным.

Согласно мировому опыту, автоматизации подвергаются следующие параметры [79,83,84]:

- температура кипящего слоя;
- расход подаваемого в печь воздуха;
- давления под сводом печи;
- концентрация диоксида серы.

При работе печи на дутье, обогащенном кислородом, также поддерживается постоянной концентрация кислорода.

Как ранее упоминалось, основным регулируемым параметром процесса обжига является температура кипящего слоя [85]. Данный параметр зависит от расхода цинкового концентрата, расхода воздуха и концентрации кислорода в дутье.

При температуре обжига менее 800 °С скорости окисления шихты становится недостаточно для поддержания горения, что может привести к потуханию. При температуре, превышающей 1000 °С, значительно возрастает опасность шлакования слоя из-за возможных его локальных перегревов [64,65].

Мировые и российские исследования высокотемпературного (от 600 °С) процесса обжига цинкового концентрата в печи кипящего слоя показали, что наиболее эффективный способ регулирования температуры слоя обеспечивается изменением расхода подаваемого в печь материала [86]. Из-за своей надежности и простоты данный способ часто применяется на отечественных предприятиях.

Если принять, что регулирование температуры осуществляется путем изменения расхода воздуха при постоянной массе концентрата, то увеличение скорости дутья приведет к пылевыносу значительной части материала и росту температуры под сводом, а уменьшение может привести к залеганию концентрата на подине, снижению производительности печи. В обоих случаях будет нарушаться режим кипения.

Регулирование температуры по изменению концентрации кислорода не целесообразно, поскольку известно его предельно допустимое значение.

На Челябинском цинковом заводе расход дутья и концентрация кислорода поддерживаются постоянными, оператором регулируется только температура кипящего слоя путем изменения расхода шихты в узких пределах.

В случае автоматизации расхода подаваемого в печь воздуха система автоматического регулирования должна обеспечить кипение слоя. Также используется регулятор соотношения расхода воздуха и подаваемой в печь шихты [77].

Разряжение под сводом печи обеспечивается режимом работы дымососа. С изменением расхода подаваемого в печь концентрата и, соответственно, расхода дутья, меняется расход продуктов сгорания и, следовательно, должен меняться режим работы дымососа. Обычно поддерживается разряжение под сводом печи на уровне 20-50 Па, при повышении давления выше поддерживаемого уровня возникает опасность попадания продуктов сгорания в цех.

Еще одним важным параметром является концентрация диоксида серы в газообразных продуктах обжига – показатель работы сернокислотной установки. Наиболее полное выжигание серы повышает качество огарка и положительно отражается на экономических показателях сернокислотного производства [16].

Идеальное (теоретическое) регулирование процесса обжига цинкового концентрата в кипящем слое выглядело бы следующим образом: регулирование концентрации диоксида серы в продуктах обжига с целью полного выжигания серы путем изменения расхода шихты в печь, а также регулирование температуры слоя изменением расхода дутьевого воздуха, при этом разрежение в надслоевом пространстве стабилизировалось бы с помощью независимого регулятора. Данный подход слишком сложен и не оправдывает себя с экономической точки зрения. Необходимую концентрацию SO_2 получают опытным путем подбора оптимальной температуры слоя. Поддержание давления газа под сводом печи и расхода дутья может производиться дистанционно, поскольку регулирование

расхода цинкового концентрата происходит в узком диапазоне (при практически стабильном технологическом режиме обжига).

В работах [83,87-90] описывается внедрение методов автоматического управления процессом обжига цинковых концентратов в печах кипящего слоя на основании математических моделей.

Применение автоматизированной системы управления процессом обжига шихты в печи кипящего слоя позволит повысить надежность и эффективность ее работы.

1.5. Выводы по главе 1

На основании проведенного исследования литературы были сформулированы следующие задачи диссертационной работы:

1. Определить основные характеристики исходной шихты и огарка: химический состав, теплоту сгорания, плотность, порозность, содержание горючих в слое, дисперсный состав.
2. Изучить кинетику окисления цинкового концентрата и основных его компонентов – сфалерита и пирита – при различных температурах и фракционных составах методом ТГА в изотермическом режиме, а именно, определить кинетические характеристики – константу скорости химического реагирования, энергию активации и предэкспоненциальный множитель.
3. С учетом полученных кинетических характеристик окисления шихты получить зависимость удельного расхода обжигаемой шихты от основных технологических параметров процесса обжига: температуры, концентрации кислорода, скорости дутья.
4. Разработать математическую модель переходных процессов в печи кипящего слоя для обжига цинковых концентратов, позволяющую рассчитать изменение температуры слоя и концентрации горючих веществ в нем при изменении расхода шихты, а также определить чувствительность основных характеристик модели на изменение входных режимных параметров системы.
5. Разработать алгоритм регулятора температуры кипящего слоя, а также с помощью приближенной модели печи кипящего слоя определить настройки регулятора для возможного его внедрения на ПАО «ЧЦЗ».

ГЛАВА 2. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА ОБЖИГА

2.1. Теплота сгорания и элементарный состав шихты

2.1.1. Экспериментальные данные

Теплота сгорания сульфидного цинкового концентрата была получена путем сжигания образца в калориметре Испытательным Центром АО «Восточный научно-исследовательский углехимический институт» (АО ВУХИН). Результаты эксперимента представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Экспериментальные данные по определению теплоты сгорания шихты

Наименование	Размерность	Аналитическое	Рабочее	Сухое
Влага	%	0,25	11,27	–
Зольность	%	83,69	74,44	83,90
Сера общая	%	29,76	26,47	29,83
Теплота сгорания		1154 ккал/кг	4025 кДж/кг	

Низшая теплота сгорания шихты в рабочем состоянии по данным ВУХИН:

$$\begin{aligned}
 Q_n^p &= \frac{100 - W^p}{100 - W^a} \cdot (4,19 \cdot Q^a + 25 \cdot W^a) - 25 \cdot W^p = \\
 &= \frac{100 - 11,27}{100 - 0,25} \cdot (4,19 \cdot 1154 + 25 \cdot 0,25) - 25 \cdot 11,27 = 4025 \text{ кДж/кг}.
 \end{aligned}$$

2.1.2. Расчетные данные

Согласно паспортным данным анализа шихты среднегодовой химический состав цинкового концентрата в сухом состоянии содержит: $Zn^d = 50,2 \%$, $Fe^d = 7,4 \%$, $Cu^d = 1,4 \%$, $Pb^d = 1,2 \%$, $S^d = 32,9 \%$, $SiO_2^d = 2,1 \%$, прочие = 4,8 %. Влажность шихты в рабочем состоянии $W^f = 10 \%$.

Сера содержится в следующих соединениях: ZnS – сфалерит; PbS – галенит; $CuFeS_2$ – халькопирит; FeS_2 – пирит, Fe_7S_8 – пирротин (Fe в соотношении 7:3).

Атомные веса: $S = 32,1$ г/моль, $Zn = 65,4$ г/моль, $Pb = 207,2$ г/моль, $Cu = 63,5$ г/моль, $Fe = 55,8$ г/моль.

Молярная масса: $ZnS = 97,4$ г/моль, $PbS = 239,3$ г/моль,
 $CuFeS_2 = 183,5$ г/моль, $FeS_2 = 120,0$ г/моль, $Fe_7S_8 = 647,4$ г/моль.

При известном среднем содержании металлических элементов в шихте можно определить количество связанной серы и массовые доли компонентов [91].

Количество связанной серы в % можно найти как:

$$S_{ZnS} = \frac{\mu_S}{\mu_{Zn}} \cdot Zn = \frac{32,1}{65,4} \cdot 50,2 = 24,6\%,$$

$$S_{PbS} = \frac{\mu_S}{\mu_{Pb}} \cdot Pb = \frac{32,1}{207,2} \cdot 1,2 = 0,2\%,$$

$$S_{CuFeS_2} = \frac{2 \cdot \mu_S}{\mu_{Cu}} \cdot Cu = \frac{2 \cdot 32,1}{63,5} \cdot 1,4 = 1,4\%,$$

$$S_{FeS_2} = \frac{2 \cdot \mu_S}{\mu_{Fe}} \cdot Fe = \frac{2 \cdot 32,1}{55,8} \cdot 7,4 \cdot \frac{7}{7+3} = 6\%,$$

$$S_{Fe_7S_8} = S - S_{ZnS} - S_{PbS} - S_{CuFeS_2} - S_{FeS_2} = 32,9 - 24,6 - 0,2 - 1,4 - 6 = 0,7\%.$$

Количество компонентов в % в исходной шихте рассчитывается как:

$$ZnS = \frac{\mu_{ZnS}}{\mu_S} \cdot S_{ZnS} = \frac{97,4}{32,1} \cdot 24,6 = 74,8\%,$$

$$PbS = \frac{\mu_{PbS}}{\mu_S} \cdot S_{PbS} = \frac{239,3}{32,1} \cdot 0,2 = 1,4\%,$$

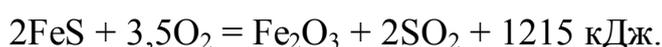
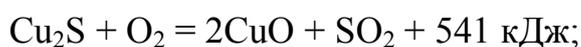
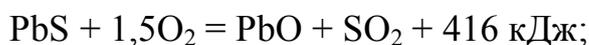
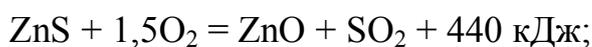
$$CuFeS_2 = \frac{\mu_{CuFeS_2}}{2 \cdot \mu_S} \cdot S_{CuFeS_2} = \frac{183,5}{2 \cdot 32,1} \cdot 1,4 = 4,1\%,$$

$$FeS_2 = \frac{\mu_{FeS_2}}{2 \cdot \mu_S} \cdot S_{FeS_2} = \frac{120}{2 \cdot 32,1} \cdot 6 = 11,2\%,$$

$$Fe_7S_8 = \frac{\mu_{Fe_7S_8}}{8 \cdot \mu_S} \cdot S_{Fe_7S_8} = \frac{647,4}{8 \cdot 32,1} \cdot 0,7 = 1,6\%.$$

Основными компонентами цинкового концентрата являются сфалерит и пирит. Суммарное содержание в сухой шихте ZnS и FeS_2 составляет около 86 %.

Основные реакции при обжиге сульфидного цинкового концентрата:



По приведенным в справочной литературе [92] данным по свободным энтальпиям различных веществ определены теплоты основных реакций, протекающих при обжиге цинкового концентрата. Теплота химической реакции рассчитывается как разность свободных энтальпий конечных продуктов и исходных веществ $Q_i = -\Sigma \Delta H_i$.

В качестве упрощения примем, что весь цинк идет на образование ZnO, свинец – на PbO, медь – на CuO, а железо – на Fe₂O₃.

Теплота основных реакций окисления, кДж/кг:

$$Q_{ZnO} = \frac{-\Delta H_{ZnO}}{\mu_{Zn}} \cdot Zn = \frac{439,8}{65,4 \cdot 10^{-3}} \cdot 50,2 = 3375,4 \text{ кДж/кг};$$

$$Q_{PbO} = \frac{-\Delta H_{PbO}}{\mu_{Pb}} \cdot Pb = \frac{416,1}{207,2 \cdot 10^{-3}} \cdot 1,2 = 23,8 \text{ кДж/кг};$$

$$Q_{CuO} = \frac{-\Delta H_{CuO}}{2 \cdot \mu_{Cu}} \cdot Cu = \frac{541,4}{2 \cdot 63,5 \cdot 10^{-3}} \cdot 1,4 = 59,8 \text{ кДж/кг};$$

$$Q_{Fe_2O_3} = \frac{-\Delta H_{Fe_2O_3}}{2 \cdot \mu_{Fe}} \cdot Fe = \frac{1215,1}{2 \cdot 55,8 \cdot 10^{-3}} \cdot 7,4 = 804,2 \text{ кДж/кг}.$$

$$Q_{\Sigma} = 3375,4 + 23,8 + 59,8 + 804,2 = 4263,2 \text{ кДж/кг}.$$

Теплота сгорания за вычетом теплоты на испарение влаги:

$$Q_n^p = Q_{\Sigma} \cdot \frac{100 - W^p}{100} - 25 \cdot W^p = 4263,2 \cdot \frac{100 - 10}{100} - 25 \cdot 10 = 3587 \text{ кДж/кг}.$$

Погрешность расчетных данных по сравнению с предоставленными экспериментальными данными ВУХИН составляет:

$$\Delta Q_n^p = \frac{4025 - 3587}{4025} \cdot 100 = 10,9\%.$$

Данные, полученные расчетным путем, близки к экспериментальным, но не включают тепловой эффект реакций образования сульфатов и переходных процессов, а также окисления серы. Поэтому далее будем использовать данные, полученные экспериментально ВУХИН.

2.2. Содержание горючих в слое

Для определения содержания горючих в слое проведен микрорентгеновский анализ проб огарка. Результаты показали, что содержание серы в огарке составляет по одному проценту в сульфидном и сульфатном видах.

Горючие вещества в слое представляют собой сульфиды. Для оценки их содержания введем допущение: пусть вся сера (1 %) находится в виде ZnS или FeS₂, тогда содержание сульфида цинка в слое будет составлять:

$$ZnS = \frac{\mu_{ZnS}}{\mu_S} \cdot S_{ZnS} = \frac{97,4}{32,1} \cdot 1 = 3\%.$$

Содержание пирита при той же концентрации серы равно:

$$FeS_2 = \frac{\mu_{FeS_2}}{\mu_S} \cdot S_{FeS_2} = \frac{120}{2 \cdot 32,1} \cdot 1 = 1,9\%.$$

Таким образом, содержание в слое горючих веществ находится на уровне 2-3 %.

2.3. Плотность шихты и огарка

2.1.3. Справочные данные

По справочным данным [43] истинная плотность основных компонентов шихты равна: сульфида цинка (ZnS) – 4080 кг/м³, пирита (FeS₂) – 4950 кг/м³.

Средняя плотность шихты при содержании основных компонентов ZnS = 75 %, FeS₂ = 11 % составляет 4200 кг/м³. С учетом примесей средняя плотность шихты в соответствии с данными ПАО «ЧЦЗ» составляет 3800 кг/м³.

Также, по справочным данным [43] истинная плотность основных компонентов огарка равна: оксида цинка (ZnO) – 5610 кг/м³, цинкового феррита (ZnO·Fe₂O₃) – 4000 кг/м³.

Средняя плотность огарка при содержании основных компонентов ZnO = 54 %, ZnO·Fe₂O₃ = 13 % составляет 5300 кг/м³. С учетом примесей средняя плотность огарка в соответствии с данными ПАО «ЧЦЗ» составляет 4800 кг/м³.

2.1.4. Экспериментальные данные

Также была определена насыпная плотность предварительно подсушенных навесок средним диаметром частиц менее 0,3 мм шихты и огарка, а также сфалерита и пирита для определения порозности материала. Измерялась масса навески при известном объеме (0,1 мл, 2,5 и 5 мл).

Насыпная плотность шихты составила около 1500 кг/м³, огарка – 2000 кг/м³, порозность при этом как для шихты, так и для огарка получилась равной 0,6. Вычитая порозность слоя при плотной укладке частиц 0,3, внутренняя порозность частиц шихты и огарка будет составлять $\varepsilon = 0,3$.

Определение порозности искусственно полученных сфалерита и пирита с содержанием примесей менее 5 % показали следующие результаты: насыпная плотность сфалерита составила около 850 кг/м³, $\varepsilon = 0,8$; пирита – около 1500 кг/м³, $\varepsilon = 0,7$. Вычитая порозность слоя при плотной укладке частиц 0,3, внутренняя порозность частиц сфалерита и пирита будет составлять $\varepsilon = 0,5$ и $\varepsilon = 0,4$ соответственно.

Все частицы являются пористыми.

2.4. Дисперсный состав шихты и огарка

2.1.5. Ситовый анализ шихты и огарка

Фракционный состав цинкового концентрата и огарка определялся ситовым методом, который заключается в рассеиве шихты в рассевочных машинах на ситах с разным размером отверстий в свету: 90, 200, 400, 630 мкм.

Часть массы навески в процентах от ее исходной массы, оставшаяся в процессе рассевки на сите соответствующего номера x , называется фракционным остатком F_x . Масса навески в процентах от исходной массы, которая осталась при рассевке на сите данного размера № x , вместе со всеми фракционными остатками на ситах с размерами больше данного называется полным остатком R_x . Таким образом, для ряда стандартных сит с номерами от 90 до 630 мкм полный остаток на «дне» будет равен:

$$R_0 = F_{630} + F_{400} + F_{200} + F_{90},$$

где F_{630} , F_{400} , F_{200} и F_{90} – фракционные остатки на ситах соответственно 630, 400, 200 и 90 мкм.

Часть материала, которая все же проходит через какое-то выбранное сито № x , называется проходом D_x . Для каждого размера из набора сит верно соотношение: $R_x + D_x = 100\%$.

Качественный характер распределения массы вещества по размерам его частиц определяется по зерновой или помольной характеристике. Для анализа полифракционности состава шихты и огарка на практике используется полная или интегральная зерновая (помольная) характеристика. Полная зерновая характеристика находится по результатам рассевки и анализа полных остатков на ситах и описывается уравнением Розина-Раммлера:

$$R_x = 100 \cdot \exp \left[- \left(\frac{x}{\delta_0} \right)^n \right], \quad (2.1)$$

где x – размер частиц (отверстий или ячеек сита), мкм; δ_0 – характерный диаметр частиц, мкм; n – коэффициент полидисперсности, отражающий внутреннюю структуру частиц.

Для определения характерного диаметра частиц (δ_0) и коэффициента полидисперсности (n) необходимо дважды прологорифмировать уравнение (2.1)

$$\ln \left(\frac{R_x}{100} \right) = - \left(\frac{x}{\delta_0} \right)^n,$$

$$\ln \left(- \ln \left(\frac{R_x}{100} \right) \right) = n \cdot (\ln x - \ln \delta_0) = n \cdot \ln x - n \cdot \ln \delta_0,$$

и для упрощения привести его к виду $Y = A \cdot X - B$, где

$$Y = \ln \left(- \ln \left(\frac{R_x}{100} \right) \right), \quad A = n, \quad X = \ln x, \quad B = n \cdot \ln \delta_0.$$

Тогда, $n = A$, $\delta_0 = \exp \left[\frac{B}{n} \right]$.

После определения коэффициента n и характерного диаметра частиц δ_0 на

основе данных, полученных при рассевке, можно построить полную или интегральную зерновую характеристику шихты.

2.1.6. Гранулометрический состав цинкового концентрата

Для ситового анализа использовались навески шихты и огарка массой 50 грамм, предварительно подсушенные в сушильном шкафу при температуре 160 °С.

В таблице 2.2 и на рисунках 2.1 и 2.2 представлен анализ фракционного состава исходной шихты.

Таблица 2.2 – Полные остатки исходной шихты на ситах

Диаметр ячеек сита	x	мкм	0	90	200	400	630
Масса	m	г	42,4	5,1	3,0	0,4	0,4
Полный остаток	Σm	г	51,3	8,9	3,8	0,8	0,4
Расчетный полный остаток по (2.1)	R_x	%	100,0	17,5	6,9	2,1	0,7
Полный остаток	R_x	%	100,0	17,4	7,5	1,6	0,8
$\ln x$	X			4,5	5,3	6,0	6,4
$\ln(-\ln(R_x/100))$	Y			0,6	1,0	1,4	1,6

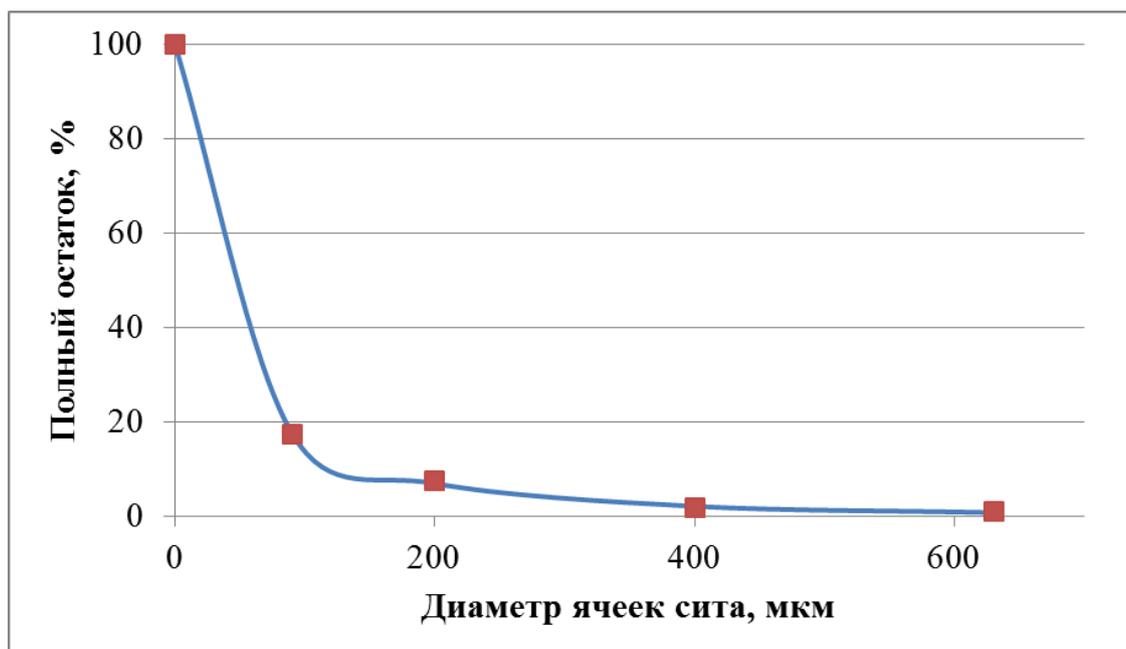


Рис. 2.1 – Полные остатки исходной шихты на ситах:

линия – расчет по (2.1), точки – эксперимент

На рисунке 2.2 представлена зависимость $Y(X)$, аппроксимация которой позволяет определить коэффициент полидисперсности n и характерный размер δ_0 частиц исходной шихты для уравнения Розина-Раммлера.

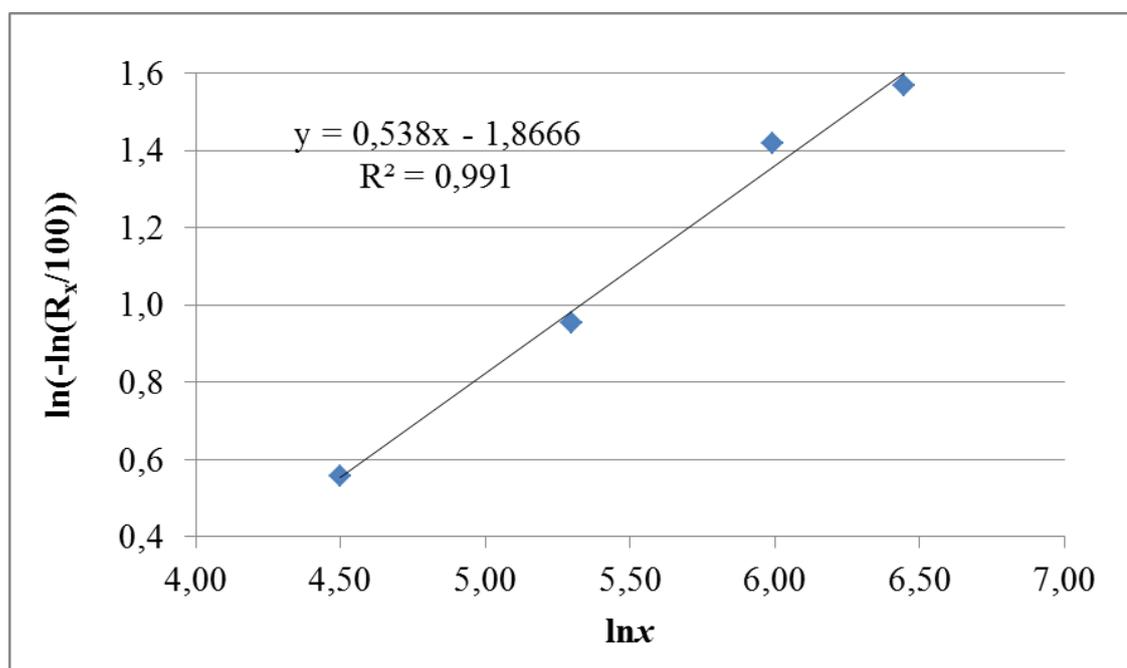


Рис. 2.2 – Зависимость двойного \ln полных остатков шихты от \ln диаметра ячеек сита

Из уравнения аппроксимации (Рис. 2.2) определяем показатель полидисперсности $n = 0,54$, определяющий размер $\delta_0 = \exp\left[\frac{B}{n}\right] = \exp\left[\frac{1,87}{0,54}\right] = 32$ мкм и среднемассовый размер $\delta_{50} = -\frac{\delta_0}{n \cdot \ln(0,5)} = -\frac{32}{0,54 \cdot \ln(0,5)} = 41$ мкм.

Фракционный состав шихты представляет собой преимущественно (более 80 %) частицы очень мелких фракций диаметром менее 90 мкм.

В таблице 2.3 и на рисунках 2.3 и 2.4 представлен анализ фракционного состава огарка.

Таблица 2.3 – Полные остатки огарка на ситах

Диаметр ячеек сита	x	мкм	0	90	200	400	630
Масса	m	г	11,2	15,9	13,0	5,5	5,6
Полный остаток	Σm	г	51,2	40,1	24,1	11,1	5,6
Расчетный полный остаток по (2.1)	R_x	%	100	76,5	51,6	23,4	8,8
Полный остаток	R_x	%	100	78,2	47,1	21,7	10,9
$\ln x$	X			4,5	5,3	6,0	6,4
$\ln(-\ln(R_x/100))$	Y			-1,4	-0,3	0,4	0,8

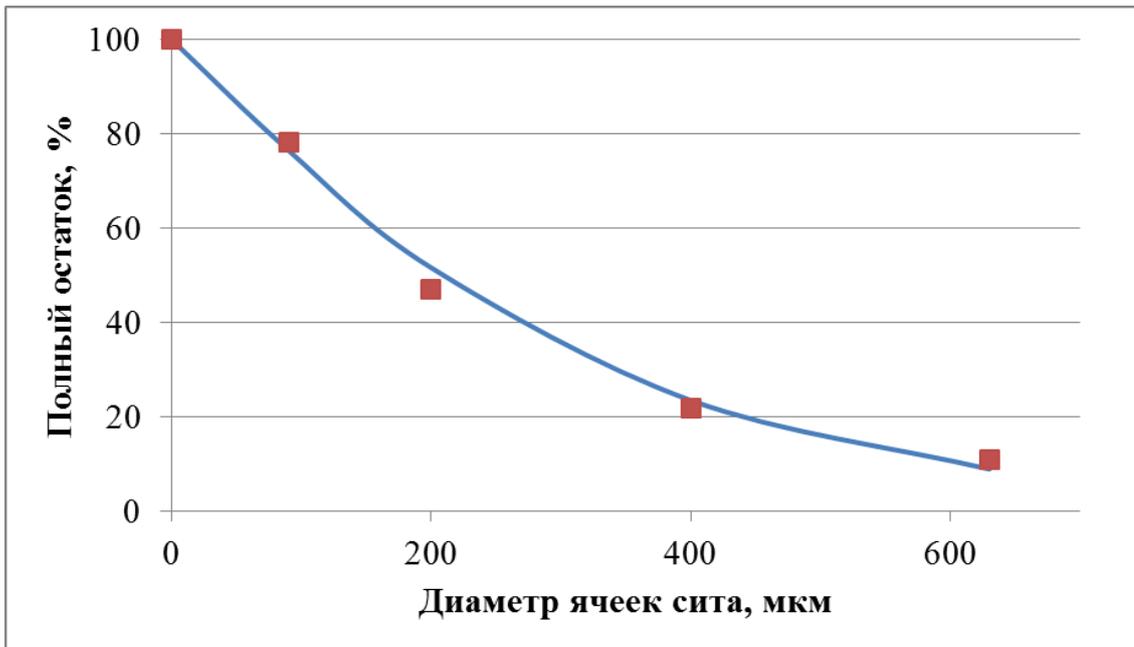


Рис. 2.3 – Полные остатки огарка на ситах:
линия – расчет по (2.1), точки – эксперимент

На рисунке 2.4 представлена зависимость $Y(X)$, аппроксимация которой позволяет определить коэффициент полидисперсности n и характерный размер δ_0 частиц огарка для уравнения Розина-Раммлера.

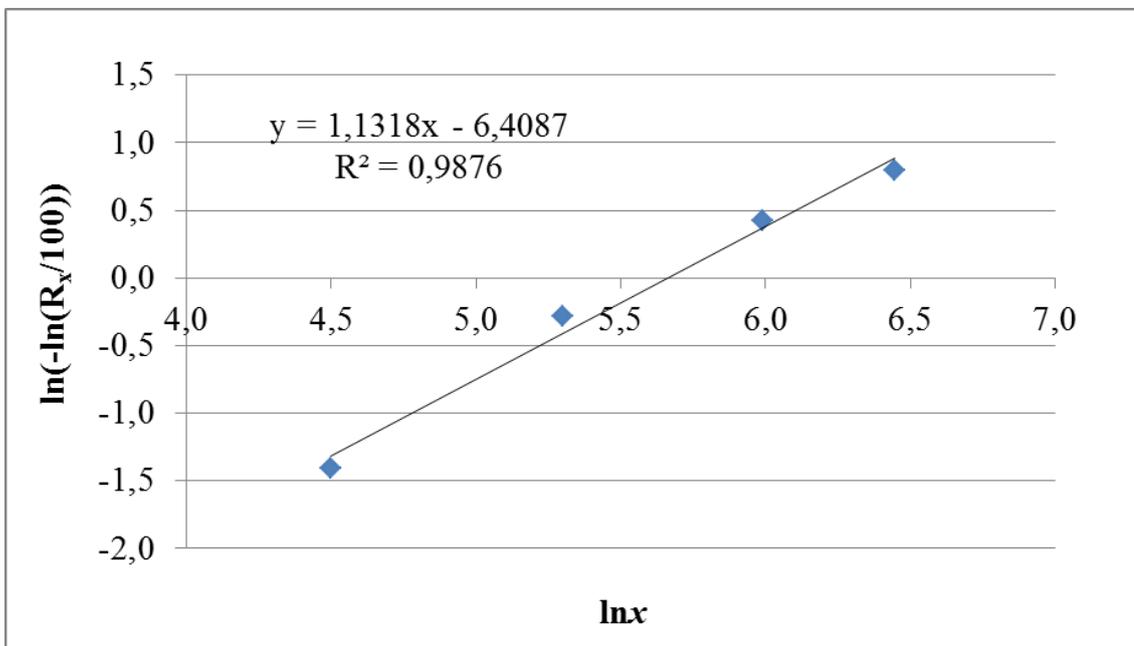


Рис. 2.4 – Зависимость двойного логарифма полных остатков огарка от логарифма диаметра ячеек сита

Из уравнения аппроксимации (Рис. 2.4) определяем показатель

полидисперсности $n = 1,13$, определяющий размер $\delta_0 = \exp\left[\frac{B}{n}\right] = \exp\left[\frac{6,4}{1,13}\right] = 288$ мкм и среднемассовый размер $\delta_{50} = -\frac{\delta_0}{n \cdot \ln(0,5)} = -\frac{288}{1,13 \cdot \ln(0,5)} = 176$ мкм.

2.1.7. Расчет доли уноса

Для устойчивой работы кипящего слоя необходимо, чтобы скорость дутья, создающего «кипение», находилась в промежутке между скоростью начала псевдооживления частиц и скоростью их витания (выноса из слоя). По рассчитанным значениям этих скоростей можно определить доли уноса и частиц, оставшихся в слое.

При известных расходах шихты, дутья и влажности определяется скорость газа в топке:

$$w = \frac{G_{вл}}{F_c} \cdot \frac{t_c + 273}{273} = \frac{5,3}{34} \cdot \frac{950 + 273}{273} = 0,7 \text{ м/с.}$$

Здесь $G_{вл}$ – расход влажных продуктов сгорания, м³/с; F_c – площадь сечения топки, м²; t_c – температура слоя, °С.

Критерий Архимеда при диаметрах начала оживления Ar_o и витания Ar_e определяется как:

$$Ar_i = \frac{g \cdot \delta_i^3 \cdot \rho_i}{\nu_g^2 \cdot \rho_g},$$

где δ_i – диаметр частиц, м; ρ_i – плотность частиц материала, кг/м³; $\rho_g = 0,29$ – плотность среды (воздуха) при температуре слоя 950 °С, кг/м³; $g = 9,81$ – ускорение свободного падения, м/с²; $\nu_g = 1,66 \cdot 10^{-4}$ – кинематическая вязкость среды (воздуха) при температуре слоя 950 °С, м²/с.

Число Рейнольдса при диаметрах начала оживления и витания определяется, соответственно, как:

$$Re_o = \frac{Ar_o}{1400 + 5,22 \cdot \sqrt{Ar_o}},$$

$$Re_e = \frac{Ar_e}{18 + 0,61 \cdot \sqrt{Ar_e}}.$$

Решая трансцендентное уравнение относительно диаметра при заданной скорости начала ожигения и витания $u = \frac{Re_i \cdot v_g}{\delta_i}$ равной скорости газов в топке, можно определить диаметр уносимых частиц и диаметр частиц, которые надежно псевдоожигаются.

Подробное описание расчета скоростей газовых потоков приведено в литературе [23,93].

Таким образом, при скорости 0,7 м/с диаметр начала ожигения для шихты составил $\delta_o = 1323$ мкм, для огарка – 1166 мкм; диаметр витания для шихты составил $\delta_g = 134$ мкм, для огарка – 119 мкм.

Полная зерновая характеристика для исходной шихты описывается выражением (2.1):

$$R_x = 100 \cdot \exp \left[- \left(\frac{x}{32,1} \right)^{0,54} \right].$$

Рассевка уносимых частиц может быть рассчитана как (Рис. 2.5):

$$R_y = \frac{\exp \left(- \left(\frac{x}{\delta_o} \right)^n \right) - \exp \left(- \left(\frac{\delta_g}{\delta_o} \right)^n \right)}{1 - \exp \left(- \left(\frac{\delta_g}{\delta_o} \right)^n \right)} \cdot 100\% .$$

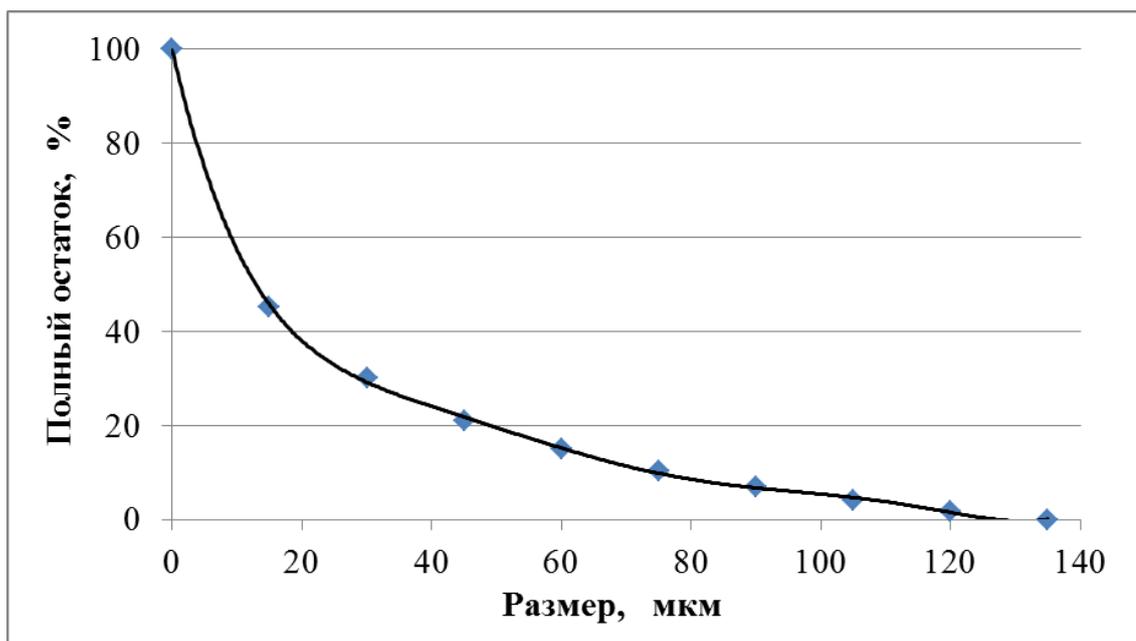


Рис. 2.5 – Рассевка уносимых из обжиговой печи частиц исходной шихты

Рассевка частиц, оставшихся в слое (Рис. 2.6):

$$R_o = \frac{\exp\left(-\left(\frac{x}{\delta_0}\right)^n\right)}{\exp\left(-\left(\frac{\delta_g}{\delta_0}\right)^n\right)} \cdot 100\% \quad (2.2)$$

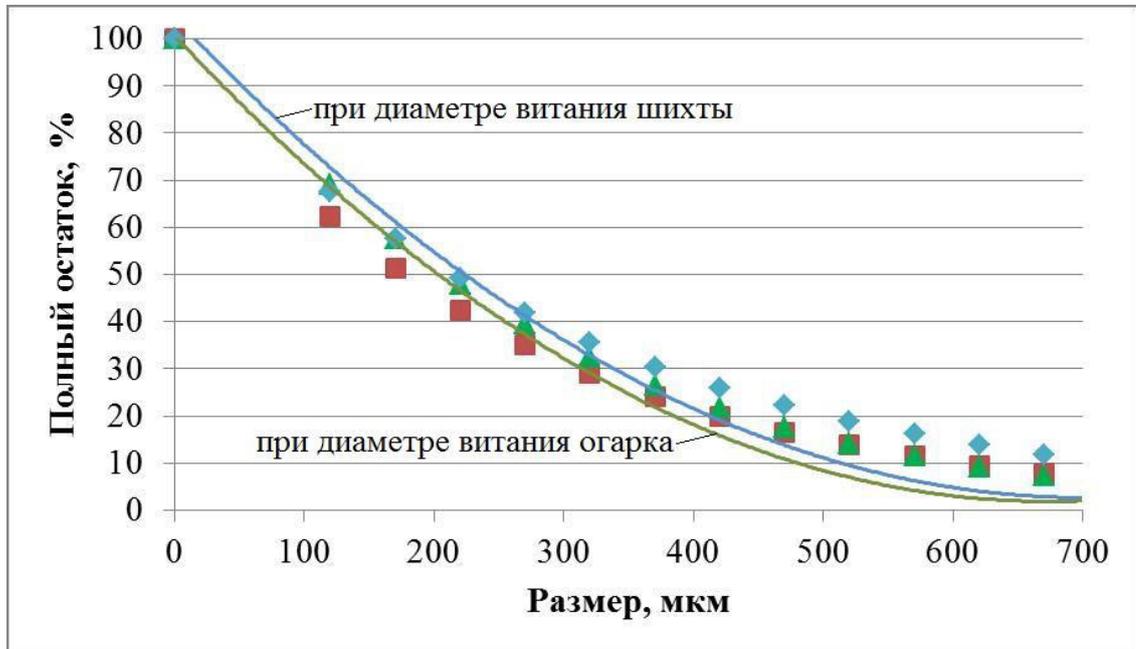


Рис. 2.6 – Рассевки оставшихся фракций в обжиговой печи:

линии – расчет остатка по диаметрам витания шихты и огарка по (2.2);

точки – экспериментальные данные, рассевки огарка

Из рисунка 2.5 видно, что при среднем размере частиц исходной шихты в 41 мкм примерно 77 % будет вынесено из слоя. В пересчете на исходную массу шихты величина уноса будет составлять:

$$77\% \cdot \frac{\mu_{ZnO}}{\mu_{ZnS}} = 77 \cdot \frac{81,4}{97,4} = 64\%.$$

Таким образом, укрупнение среднего размера частиц слоя (до 176 мкм) по сравнению с исходным дисперсным составом шихты (41 мкм) обусловлено выносом мелких фракций.

Из-за огромной массы слоя более 100 т мелкодисперсные частицы не сразу покидают слой и, следовательно, успевают нагреться и прореагировать с кислородом.

2.5. Выводы по главе 2

1. Определены основные характеристики исходной шихты и огарка: химический состав, теплота сгорания, плотность, порозность, содержание горючих в слое, дисперсный состав.
2. Расчет показал, что укрупнение среднего размера частиц слоя (до 176 мкм) по сравнению с исходным дисперсным составом шихты (41 мкм) обусловлено выносом мелких фракций. Доля уноса при этом составляет примерно 64 %.

ГЛАВА 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ КОНСТАНТ ОКИСЛЕНИЯ

3.1. Лабораторная установка и методика проведения экспериментов

В лабораторных условиях был проведен ряд экспериментов для изучения кинетики окисления шихты и основных ее компонентов. Опыты выполнялись на приборе синхронного термического анализа NETZSCH STA 449 F3, совмещенного с масс-спектрометрической системой QMS 403C Aeolos [94]. Данный прибор предназначен для определения изменения массы вещества, одновременного измерения тепловых эффектов, а также для анализа газовой смеси продуктов реакции. На рисунке 3.1 приведена фотография лабораторной установки. Схема измерительного блока печи приведена на рисунке 3.2.



Рис. 3.1 – Лабораторная установка

1 – компьютер, обеспечивающий сбор и обработку информации; 2 – масс-спектрометр; 3 – печь с блоком измерения и управления; 4 – установка подачи и смешивания газов.

Исследования проводились на шихте, предоставленной Челябинским цинковым заводом, и чистых (содержание примесей не превышает 5 %) искусственно полученных порошкообразных веществах – сфалерите (ZnS) и пирите (FeS_2).

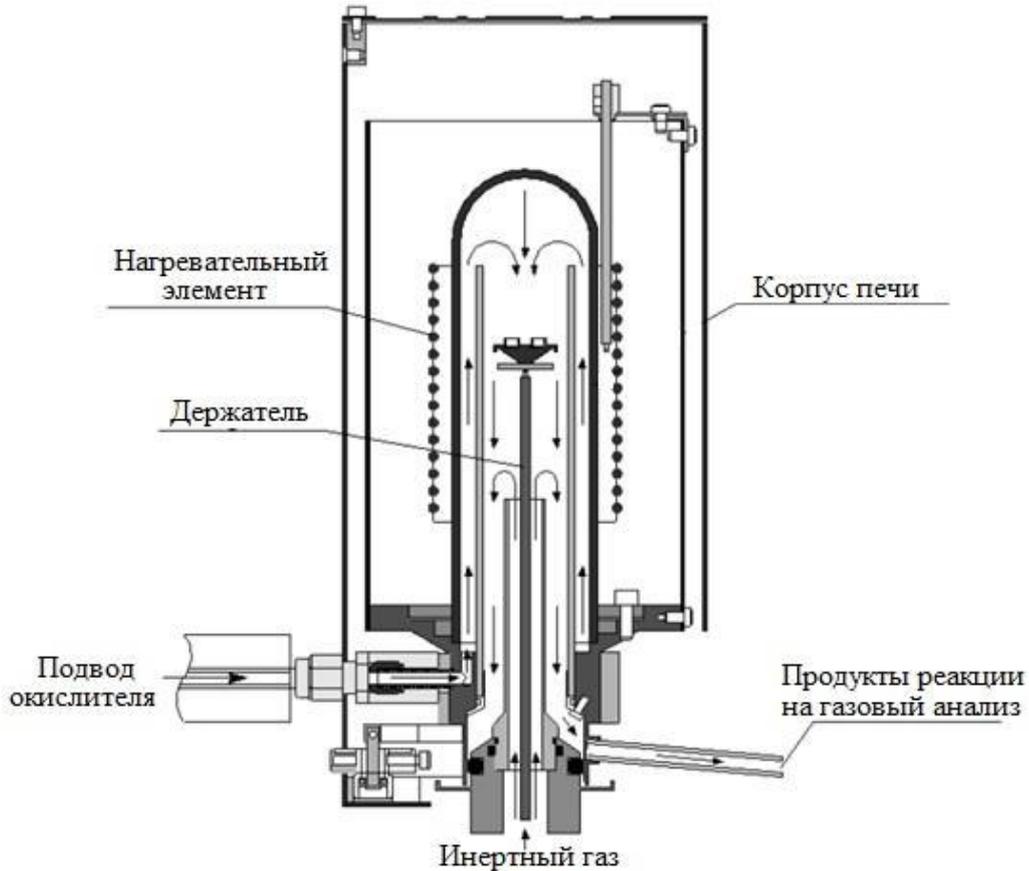


Рис. 3.2 – Измерительный блок печи

В один из тиглей термогравиметрического держателя (Рис. 3.3) помещалась навеска материала. Обжиг проводился в изотермическом режиме в печи прибора при различных температурах. Нагрев до заданной температуры производился в среде аргона (99,9998 %) со скоростью 20 °С/мин, затем подавался воздух (или обогащенный кислородом до 28 %). Расходы аргона и воздуха соответственно составляли 6 и 8 нл/час. Непрерывно измерялась масса образца и относительная концентрация газообразных продуктов реакции.

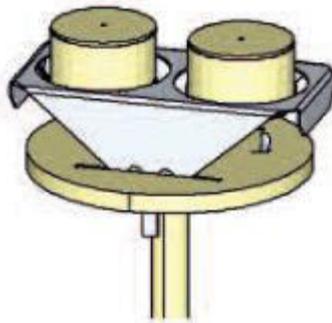


Рис. 3.3 – Термогравиметрический держатель

По результатам каждого эксперимента строился график изменения массы навески в зависимости от времени и температуры, после математической обработки определялась скорость химического реагирования окисляемого вещества.

Образовавшиеся в ходе реакций газообразные продукты анализировались масс-спектрометром. Принцип работы данного прибора заключается в разделении молекул газа под действием магнитного или электрического поля на ионы, которые затем сортируются по массовому числу (отношению массы иона m к его заряду q).

В экспериментах использовали навески узких фракций: 0-200, 200-400, 400-630 мкм, при этом средний размер частиц составлял: 100, 300 и 515 мкм [95,96]. При проведении опытов по обжигу навесок шихты разной массы (5, 10, 14, 20 и 24 мг) со средним диаметром 100 мкм было обнаружено, что при массе образца до 10 мг скорость химического реагирования остается постоянной, а больше 10 мг – начинает снижаться за счет диффузии кислорода в слой. На рисунке 3.4 приведены фотографии с навесками шихты массой 5, 10 и 20 мг и средним диаметром 515 мкм.

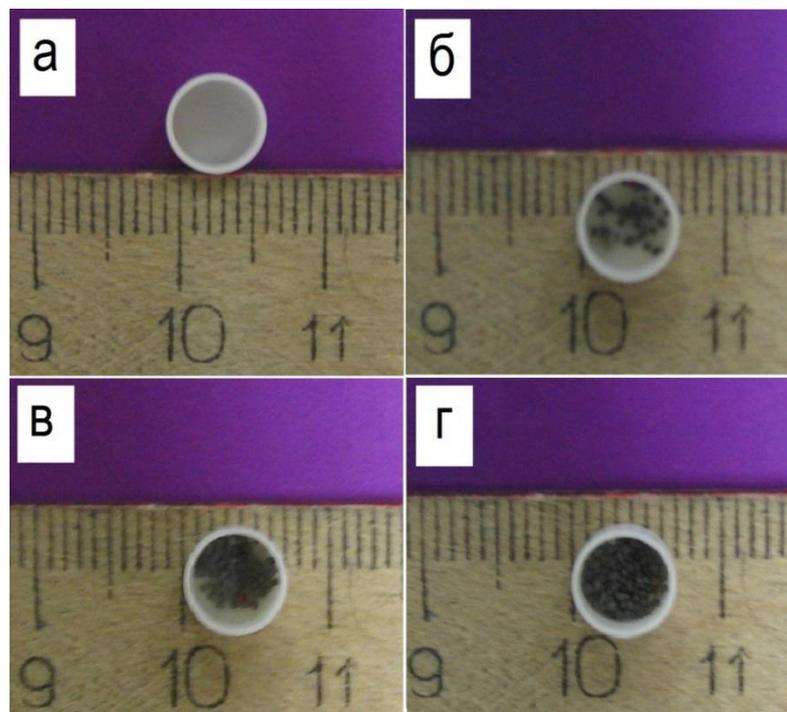


Рис. 3.4 – Фотографии навесок шихты со средним диаметром 515 мкм:

а – пустой тигель, б – масса 5 мг, в – масса 10 мг, г – масса 20 мг

Из фотографий видно, что навеска массой 10 мг и меньше не закрывает полностью дно, частицы располагаются в один ряд и обеспечивается равнодоступность поверхности для проникновения кислорода, поэтому дальнейшие исследования проводились с образцами массой 10 мг.

При высокотемпературном воздействии серосодержащих веществ на платино-родиевую термопару происходит постепенное образование ячеистой структуры в металле. При дополнительном механическом воздействии, которое возникает при установке и удалении тигля с держателя прибора термогравиметрического анализа, возможно повреждение в зоне примыкания термопары к нижней поверхности площадки, где размещаются тигли. Поэтому количество проведенных экспериментов было ограничено.

По данным [97] была рассчитана относительная систематическая погрешность определения скорости убыли массы для рабочего диапазона температур, которая не превышала 2 %, массы навески – $\leq 1\%$, температуры навески – $\leq 3\%$.

3.2. Определение кинетических характеристик окисления сульфида цинка

Сфалерит представляет собой белый порошок различных фракций. Для экспериментов использовались навески со средним размером частиц 100, 300 и 515 мкм. Обжиг навески порошкообразного ZnS проводили при температурах 700, 800 и 900 °С в среде воздуха, а также обогащенного до 28 % кислородом воздуха. На рисунке 3.5 приведено изменение массы с течением времени образца сфалерита при температуре 900 °С в среде воздуха.

В период прогрева навески в среде аргона происходит незначительное уменьшение массы за счет выхода адсорбированной влаги и реагирования сульфида цинка с остаточным кислородом, находящимся в порах вещества. Газовый анализ показывает незначительное образование SO₂ в диапазоне температур 200-300 °С. При подаче воздуха происходит резкое, практически линейное, уменьшение массы навески за счет протекания реакции окисления.

В этот же момент масс-спектрометр фиксирует образование SO_2 . На рисунке 3.6 представлена кривая ионного тока с массовым числом 64, характеризующая образование SO_2 при окислении сульфида цинка.

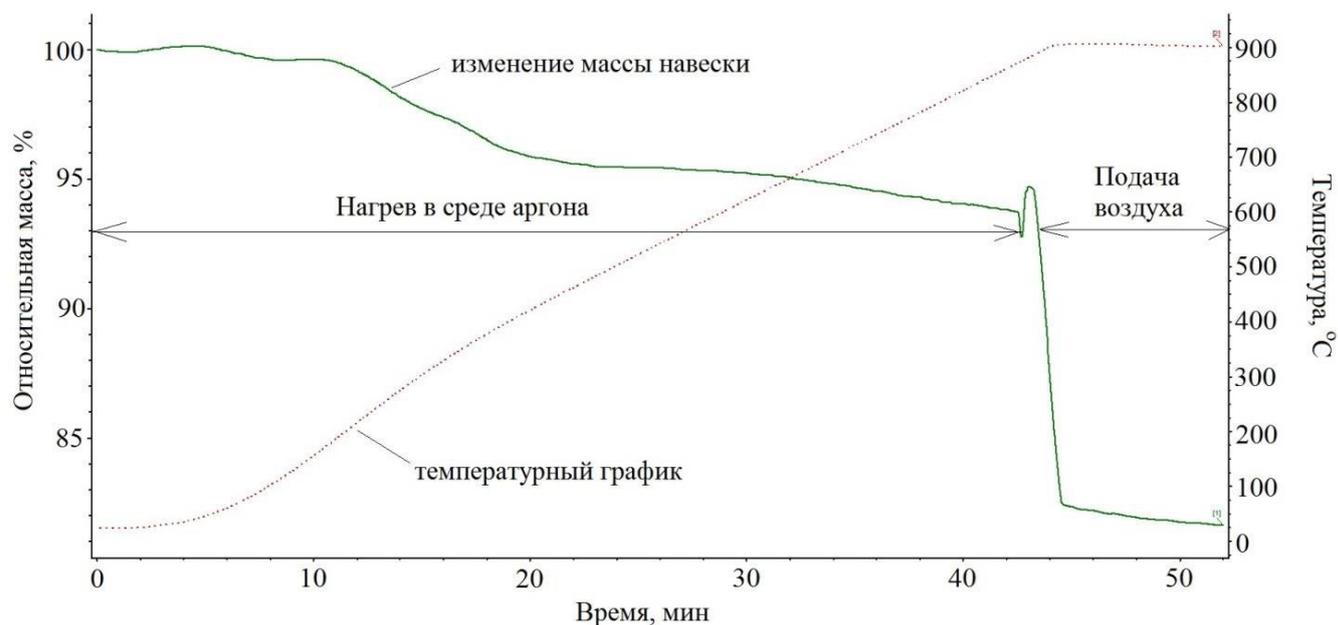


Рис. 3.5 – Изменение массы навески сфалерита при $t = 900^\circ\text{C}$

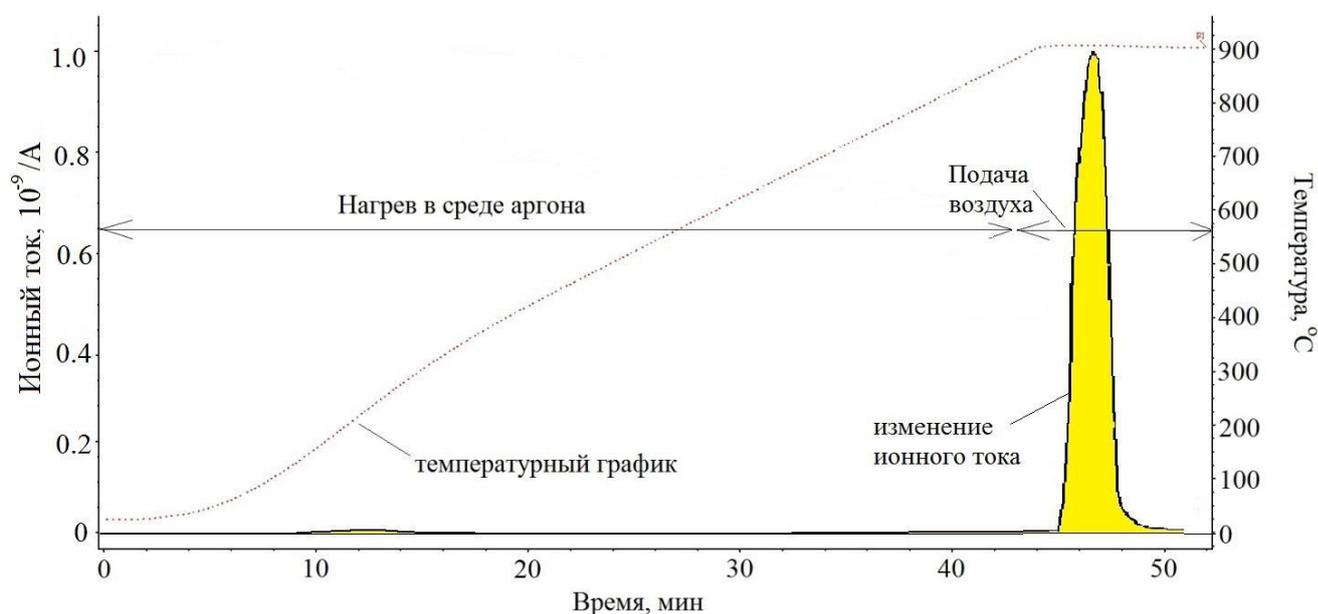


Рис. 3.6 – Изменение ионного тока (SO_2) при обжиге сфалерита при $t = 900^\circ\text{C}$

Реакция окисления сульфида цинка: $\text{ZnS} + 1,5\text{O}_2 = \text{ZnO} + \text{SO}_2$.

Молярные массы веществ $\mu_{\text{ZnS}} = 97,4$ г/моль, $\mu_{\text{ZnO}} = 81,4$ г/моль. При окислении $\text{ZnS} = 100\%$ максимальное изменение массы составит:

$$\frac{\Delta m_{\max}}{m_0} \cdot \text{ZnS} = \frac{\mu_{\text{ZnS}} - \mu_{\text{ZnO}}}{\mu_{\text{ZnS}}} \cdot 100 = \frac{97,4 - 81,4}{97,4} \cdot 100 = 16,5 \%$$

На рисунке 3.5 относительное изменение массы при подаче воздуха составило около 13 % (от 94 до 81 %), что свидетельствует о практически полном завершении реакции в течение 50 секунд. Аналогичное изменение массы реагирующего сульфида цинка наблюдалось и при других температурах, но время полного его окисления при пониженных температурах увеличивалось.

Как показали эксперименты (Таблица 3.1), массовое количество сульфида цинка, реагирующего в единицу времени $J = \xi \cdot \frac{m_0 \cdot d(m/m_0)}{d\tau}$, кг/с, (где m_0 – начальная масса реагирующего вещества, кг, ξ – коэффициент, учитывающий исчезновение исходного вещества) не зависит от диаметра частиц в навеске (при массе навески равной 10 мг), а зависит только от температуры обжига. Это свидетельствует о протекании реакции во всем объеме частицы [95,96,98].

В таблице 3.1 приведены экспериментальные данные при различных температурах и фракционных составах по убыли массы навесок сульфида цинка в единицу времени, полученные усреднением их на линейном участке графиков.

Таблица 3.1 – Экспериментальные данные по убыли массы сфалерита в единицу времени

ZnS					
Температура	T	К	973	1073	1173
		°C	700	800	900
Диаметр 100 мкм (21 % O ₂) (m = 10 мг)					
Поток реагирующего вещества	<i>J</i>	кг/с	$9,1 \cdot 10^{-8}$	$11,4 \cdot 10^{-8}$	$12,3 \cdot 10^{-8}$
Диаметр 300 мкм (21 % O ₂) (m = 10 мг)					
Поток реагирующего вещества	<i>J</i>	кг/с	$9,2 \cdot 10^{-8}$	$11,2 \cdot 10^{-8}$	$12,3 \cdot 10^{-8}$
Диаметр 515 мкм (21 % O ₂) (m = 10 мг)					
Поток реагирующего вещества	<i>J</i>	кг/с	$9,1 \cdot 10^{-8}$	$11,3 \cdot 10^{-8}$	$12,5 \cdot 10^{-8}$

Снимки под микроскопом навесок сульфида цинка доказывают, что частицы имеют развитую пористую поверхность как до, так и после обжига (Рис. 3.7).

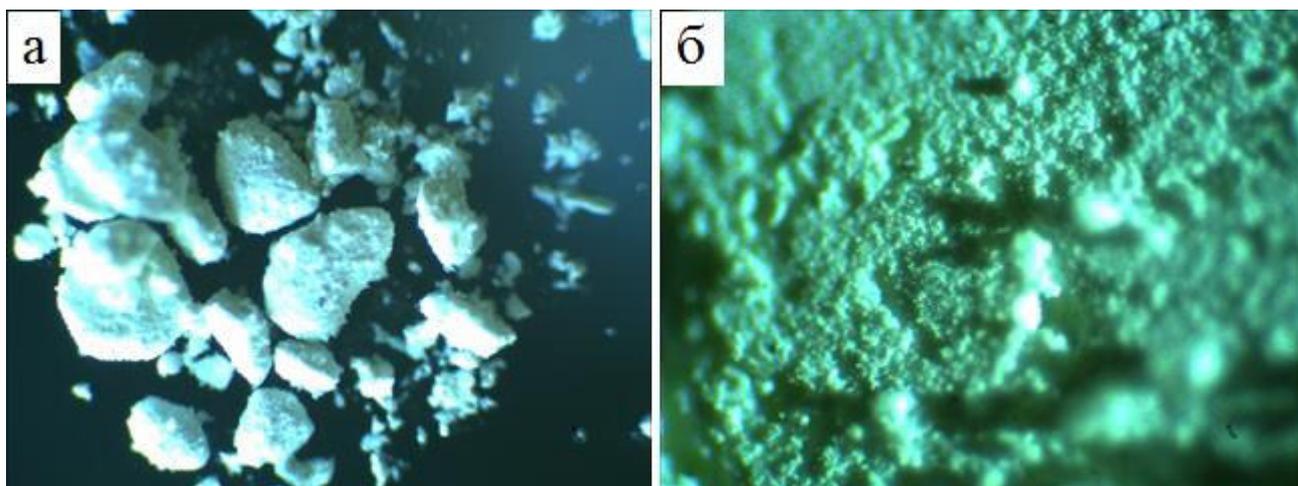


Рис. 3.7 – Частицы сфалерита: а – до обжига, б – после обжига

Таким образом, можно считать, что при малой массе навески, когда толщина слоя в тигле предположительно меньше глубины проникновения кислорода в слой, поверхность всех частиц в навеске равнодоступна и концентрация кислорода в слое равна концентрации кислорода в дутье [99]. В этом случае можно записать поток реагирующего вещества как для одиночной частицы [95,98,100].

Выражение для изменения массы одиночной частицы реагирующего сфалерита в кг/с формально может быть записано как:

$$J = \frac{dm}{d\tau} = \xi \cdot \frac{m_0 \cdot d(m/m_0)}{d\tau} = -\nu \cdot k \cdot \pi \cdot \delta^2 \cdot (1 + \zeta_0 \cdot S_i) \cdot C_{O_2}, \text{ кг/с.} \quad (3.1)$$

Здесь: ν – коэффициент, учитывающий соотношение молярных масс исходного вещества и кислорода в соответствии со стехиометрическими коэффициентами; k – константа скорости химического реагирования, отнесенная к внешней поверхности частицы, м/с; δ – диаметр частиц, м; ζ_0 – глубина проникновения реакции, м; S_i – удельная внутренняя поверхность реагирования, м²/м³; C_{O_2} – концентрация кислорода в слое, кг/м³.

Выражая площадь поверхности частицы через начальную массу частицы как

$$\pi \cdot \delta^2 = \frac{m_0}{\rho} \cdot \frac{6}{\delta},$$

и подставляя ее в (3.1), получим

$$-\xi \cdot \frac{m_0 \cdot d(m/m_0)}{d\tau} = \nu \cdot k \cdot \frac{m_0}{\rho} \cdot \frac{6}{\delta} \cdot (1 + \zeta_0 \cdot S_i) \cdot C_{O_2},$$

где ρ – плотность вещества с учетом внутренней порозности частицы, кг/м^3 .

Считая, что в случае реагирования частиц малых размеров активная глубина реакции равна $\zeta_0 = \frac{\delta}{6}$, м [99], и пренебрегая реагированием на поверхности частицы по сравнению с внутренним реагированием [101,102], получим выражение для расчета произведения скорости химического реагирования на удельную внутреннюю поверхность

$$-\xi \cdot \frac{d(m/m_0)}{d\tau} = \nu \cdot \frac{k}{\rho} \cdot \frac{6}{\delta} \cdot \frac{\delta}{6} \cdot S_i \cdot C_{O_2}$$

или в окончательном виде

$$K = k \cdot S_i = -\frac{\xi}{\nu} \cdot \frac{\rho}{C_{O_2}} \cdot \frac{d(m/m_0)}{d\tau}, \text{ с}^{-1}. \quad (3.2)$$

Коэффициенты, входящие в (3.2) представляют собой коэффициент, учитывающий количество исходного вещества, вступившего в реакцию, отнесенное к видимому изменению массы

$$\xi = \frac{\mu_{ZnS}}{\mu_{ZnS} - \mu_{ZnO}} = \frac{97,4}{97,4 - 81,4} = 6,07 \quad (3.3)$$

и коэффициент, учитывающий соотношение молярных масс исходного вещества и кислорода в соответствии со стехиометрическими коэффициентами [95,98]

$$\nu = \frac{\mu_{ZnS}}{1,5 \cdot \mu_{O_2}} = \frac{97,4}{1,5 \cdot 32} = 2,03. \quad (3.4)$$

В ходе математической обработки опытных данных по обжигу сфалерита по формуле (3.2) получены следующие результаты (Таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Обработка экспериментальных данных по обжигу сфалерита

ZnS					
Температура	T	К	973	1073	1173
		°C	700	800	900
Диаметр 100 мкм (21 % O ₂) ($m = 10$ мг)					
Произведение	$k \cdot S_i$	c ⁻¹	108	147	177
Диаметр 300 мкм (21 % O ₂) ($m = 10$ мг)					
Произведение	$k \cdot S_i$	c ⁻¹	105	145	178
Диаметр 300 мкм (28 % O ₂) ($m = 10$ мг)					
Произведение	$k \cdot S_i$	c ⁻¹	106	–	172
Диаметр 515 мкм (21 % O ₂) ($m = 10$ мг)					
Произведение	$k \cdot S_i$	c ⁻¹	105	144	174

Из расчетов видно, что произведение $k \cdot S_i$ практически не зависит от начального диаметра частиц и является функцией температуры.

Эксперименты показали, что значения эффективной константы скорости химического реагирования в среде воздуха с концентрацией кислорода 21 % и обогащенного кислородом до 28 % практически совпадают [95,96]. С увеличением концентрации кислорода в дутье величина потока реагирующего ZnS оказалась пропорциональна концентрации кислорода в первой степени, при этом значение эффективной константы скорости химического реагирования осталась неизменной. Это позволяет сделать вывод, что реакция $ZnS + 1,5O_2$ имеет первый порядок по кислороду.

На рисунке 3.8 представлена обобщенная зависимость натурального логарифма комплекса $k \cdot S_i$ от обратной температуры для частиц сфалерита различного диаметра и при различных концентрациях кислорода, с помощью которой можно получить значения предэкспоненциального множителя и энергии активации.

По данным аппроксимации, представленной на рисунке 3.8, величина предэкспоненциального множителя составляет: $k_0 = \exp(7,6202) = 2039 \text{ c}^{-1}$.

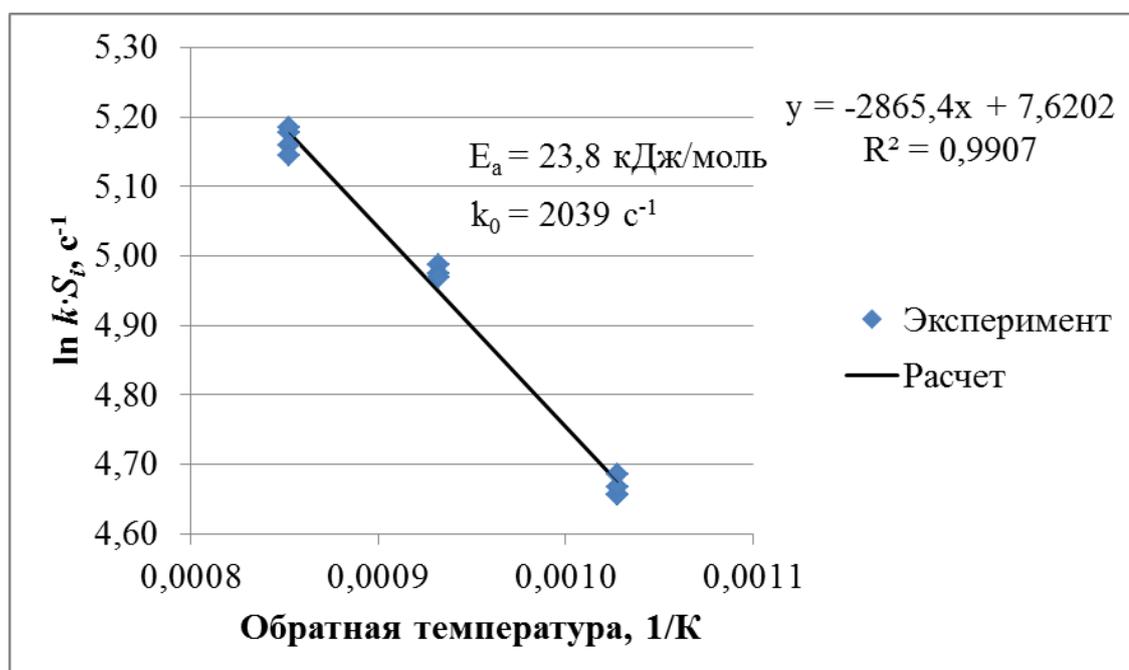


Рис. 3.8 – Зависимость $\ln(k \cdot S_i) = f(1/T)$ для частиц ZnS различного диаметра при различных концентрациях кислорода:
 линия – расчет по (3.5), точки – эксперимент

Энергия активации равна: $E_a = 2865,4 \cdot 8,314 = 23823$ кДж/кмоль.

Таким образом, обработка экспериментальных данных в координатах $\ln(k \cdot S_i) = f(1/T)$ (Рис. 3.8) позволила получить эмпирическую зависимость для эффективной константы скорости химического реагирования в виде (уравнение Аррениуса):

$$K = k \cdot S_i = k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T}\right) = 2039 \cdot \exp\left(-\frac{23823}{8,314 \cdot T}\right), \text{ c}^{-1}. \quad (3.5)$$

Коэффициент детерминации (среднеквадратичное отклонение) уравнения, представленного на рисунке 3.8, определяет погрешность измерений, которая составляет 0,93 %.

При известном комплексе $k \cdot S_i$ и рассчитанном коэффициенте молекулярной диффузии кислорода в азоте [103,104] по выражению

$$D = D_0 \cdot \left(\frac{T}{273}\right)^{1,9} = 0,16 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{T}{273}\right)^{1,9}, \text{ м}^2/\text{с}, \quad (3.6)$$

можно определить глубину проникновения кислорода в слой сфалерита:

$$\zeta_0 = \sqrt{\frac{D}{k \cdot S_i}} = 0,0012 \text{ м (1,2 мм)}.$$

Таким образом, можно сделать вывод, что для всех частиц реагирующего сульфида цинка глубина проникновения реакции в объем частицы превышает ее диаметр.

3.3. Определение кинетических характеристик окисления сульфида железа

Пирит представляет собой серебристый порошок различных фракций. Для экспериментов использовались навески со средним размером частиц 100 и 300 мкм. Обжиг навески сульфида железа проводили при температурах 450, 600 и 900 °С с размером частиц 100 мкм и при температурах 800 и 900 °С с размером частиц 300 мкм в среде воздуха. На рисунке 3.9 приведено изменение массы с течением времени образца пирита при температуре 900 °С.

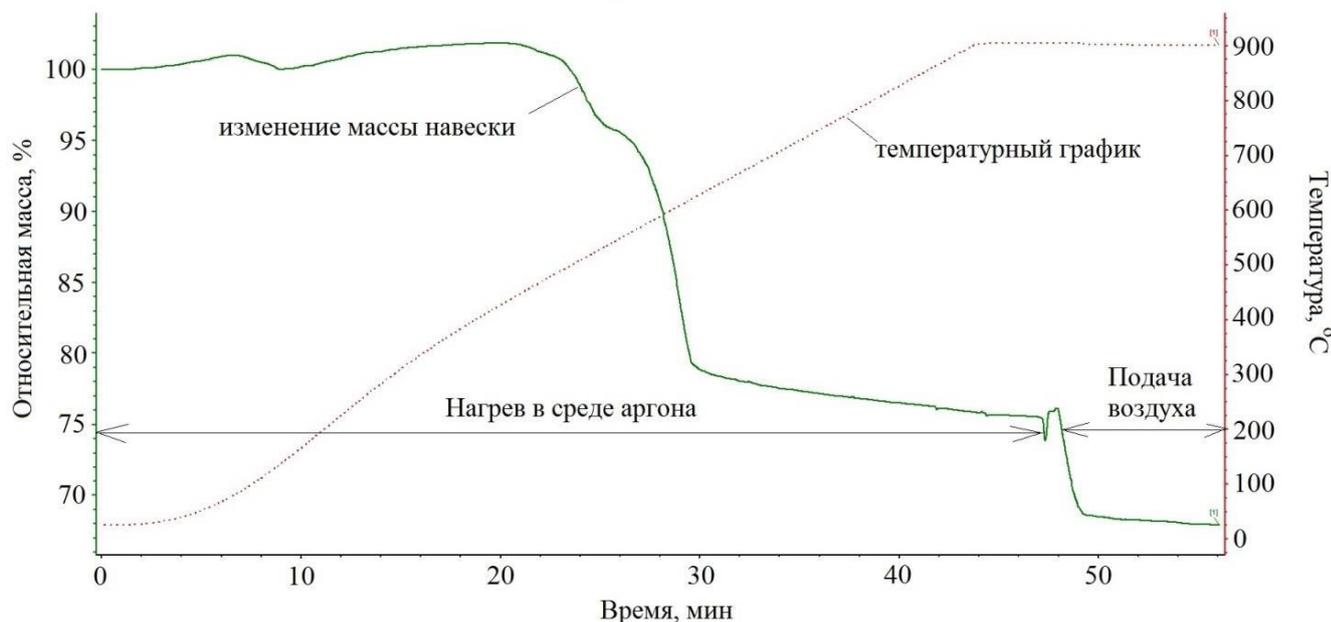


Рис. 3.9 – Изменение массы навески пирита при $t = 900 \text{ }^\circ\text{C}$

В период прогрева навески в среде аргона сначала происходит незначительное уменьшение массы за счет выхода влаги. При достижении температуры в печи 400 °С начинают протекать реакции диссоциации сульфида железа [105,106], масс-спектрометр фиксирует образование SO_2 . При подаче

воздуха происходит резкое, практически линейное, уменьшение массы навески за счет протекания реакции окисления. Также масс-спектрометр фиксирует образование SO_2 . На рисунке 3.10 представлена кривая ионного тока с массовым числом 64, характеризующая образование SO_2 при окислении сульфида железа.

Реакция окисления пирита: $2\text{FeS}_2 + 5,5\text{O}_2 = \text{Fe}_2\text{O}_3 + 4\text{SO}_2$.

Молярные массы веществ $\mu_{\text{FeS}_2} = 120$ г/моль, $\mu_{\text{Fe}_2\text{O}_3} = 159,7$ г/моль. При окислении $\text{FeS}_2 = 100$ % максимальное изменение массы составит:

$$\frac{\Delta m_{\text{max}}}{m_0} \cdot \text{FeS}_2 = \frac{\mu_{2\text{FeS}_2} - \mu_{\text{Fe}_2\text{O}_3}}{\mu_{2\text{FeS}_2}} \cdot 100 = \frac{2 \cdot 120 - 159,7}{2 \cdot 120} \cdot 100 = 33,4 \%$$

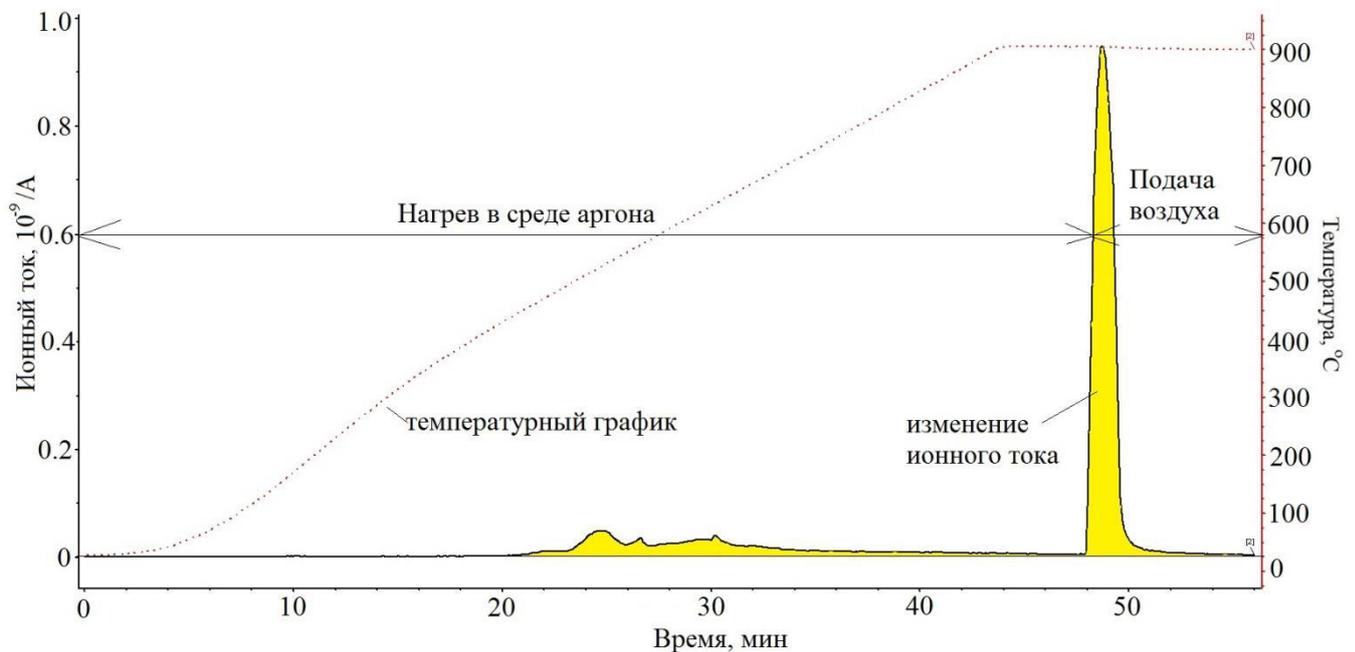


Рис. 3.10 – Изменение ионного тока (SO_2) при обжиге пирита при $t = 900$ °C

На рисунке 3.9 относительное изменение массы при протекании реакции диссоциации сульфида железа и окисления его кислородом составило около 31 % (от 99 до 68 %), что свидетельствует о практически полном завершении реакции. Аналогичное изменение массы реагирующего сульфида железа наблюдалось и при других температурах, но время полного его окисления при пониженных температурах увеличивалось.

В соответствии с выражениями (3.3) и (3.4) для сфалерита, коэффициенты для реакции окисления пирита:

$$\xi = \frac{\mu_{2FeS_2}}{\mu_{2FeS_2} - \mu_{Fe_2O_3}} = \frac{2 \cdot 120}{2 \cdot 120 - 159,7} = 2,99; \nu = \frac{\mu_{2FeS_2}}{5,5 \cdot \mu_{O_2}} = \frac{2 \cdot 120}{5,5 \cdot 32} = 1,36. \quad (3.7)$$

Поскольку пирит – один из основных компонентов цинкового концентрата, а результаты экспериментов со сфалеритом (Таблица 3.1) и шихтой (Таблица 3.5) показали, что убыль массы материала практически не зависит от размера частиц в навеске массой 10 мг, а влияет только температура проведения реакции окисления, то можно сделать вывод, что данное заключение применимо и к пириту. Также данное заключение подтверждается экспериментами с навесками пирита со средним диаметром частиц 100 и 300 мкм при температуре 900 °С. Поэтому будем руководствоваться теми же принципами, что и при определении кинетических характеристик сфалерита.

В таблице 3.3 приведены экспериментальные данные при различных температурах и фракционных составах по убыли массы навесок сульфида железа в единицу времени, полученные усреднением их на линейном участке графиков.

Таблица 3.3 – Экспериментальные данные по убыли массы пирита в единицу времени

FeS₂						
Температура	T	К	723	873	1073	1173
		°С	450	600	800	900
Диаметр 100 мкм (<i>m</i> = 10 мг)						
Поток реагирующего вещества	<i>J</i>	кг/с	2,5 · 10 ⁻⁸	3,1 · 10 ⁻⁸	–	4,3 · 10 ⁻⁸
Диаметр 300 мкм (<i>m</i> = 10 мг)						
Поток реагирующего вещества	<i>J</i>	кг/с	–	–	3,8 · 10 ⁻⁸	4,3 · 10 ⁻⁸

Снимки под микроскопом навесок сульфида железа доказывают, что частицы имеют развитую пористую поверхность как до, так и после обжига (Рис. 3.11).

В ходе математической обработки опытных данных по обжигу пирита по формуле (3.2) получены следующие результаты (Таблица 3.4).

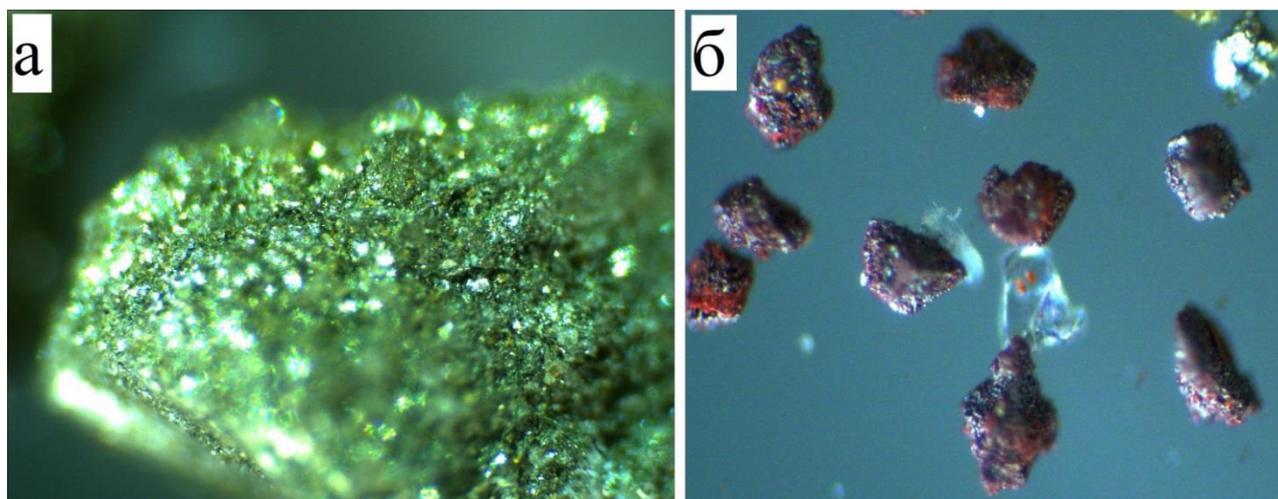


Рис. 3.11 – Частицы пирита: а – до обжига, б – после обжига

Таблица 3.4 – Обработка экспериментальных данных по обжигу пирита

FeS₂						
Температура	<i>T</i>	К	723	873	1073	1173
		°С	450	600	800	900
Диаметр 100 мкм (<i>m</i> = 10 мг)						
Произведение	<i>k</i> · <i>S_i</i>	с ⁻¹	48	71	–	129
Диаметр 300 мкм (<i>m</i> = 10 мг)						
Произведение	<i>k</i> · <i>S_i</i>	с ⁻¹	–	–	108	133

На рисунке 3.12 представлена зависимость натурального логарифма комплекса $k \cdot S_i$ от обратной температуры для частиц пирита, при аппроксимации которой можно получить значения предэкспоненциального множителя и энергии активации: $k_0 = \exp(6,491) = 659 \text{ с}^{-1}$, $E_a = 1915,2 \cdot 8,314 = 15923 \text{ кДж/кмоль}$.

Эффективная константа скорости химического реагирования будет иметь вид:

$$K = k \cdot S_i = k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T}\right) = 659 \cdot \exp\left(-\frac{15923}{8,314 \cdot T}\right), \text{ с}^{-1}. \quad (3.8)$$

Коэффициент детерминации (среднеквадратичное отклонение) уравнения, представленного на рисунке 3.12, определяет погрешность измерений, которая составляет 0,38 %. При известном комплексе $k \cdot S_i$ и рассчитанном коэффициенте

молекулярной диффузии кислорода в азоте (3.6) глубина проникновения

кислорода в слой пирита составляет: $\zeta_0 = \sqrt{\frac{D}{k \cdot S_i}} = 0,0014 \text{ м (1,4 мм)}$.

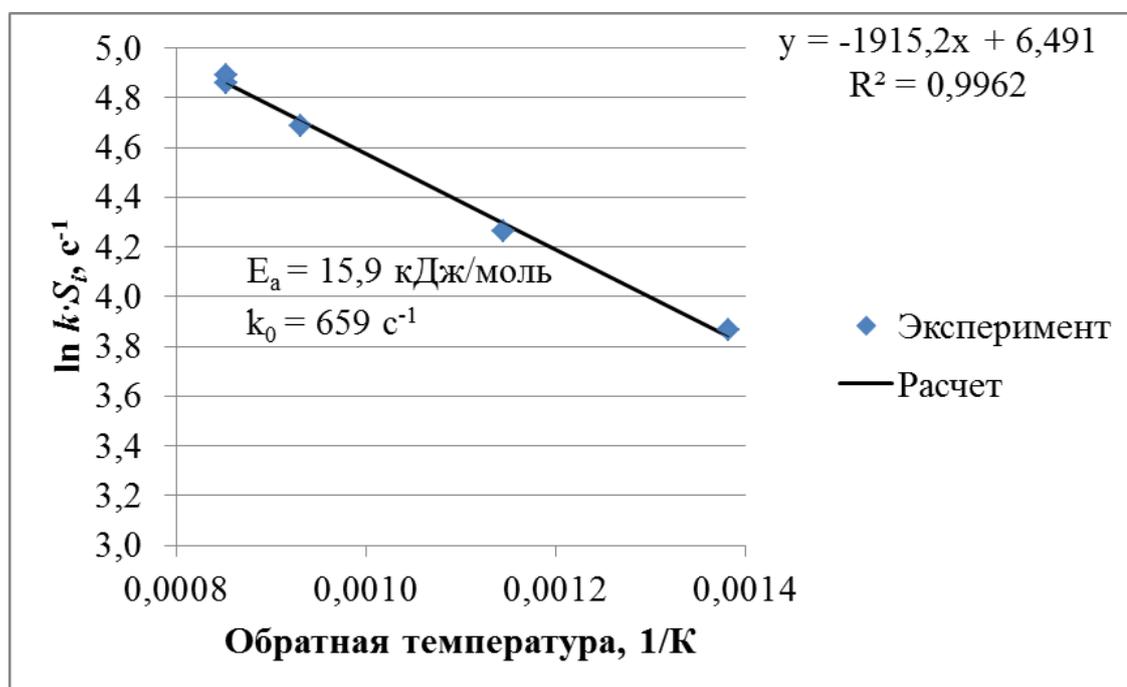


Рис. 3.12 – Зависимость $\ln(k \cdot S_i) = f(1/T)$ для частиц FeS_2 :

линия – расчет по (3.8), точки – эксперимент

Таким образом, можно сделать вывод, что для всех частиц реагирующего сульфида железа глубина проникновения реакции в объем частицы превышает ее диаметр.

3.4. Определение кинетических характеристик цинкового концентрата

Шихта представляет собой серый порошок различных фракций. Для экспериментов использовались навески со средним размером частиц $\delta = 100, 300$ и 515 мкм . Обжиг навески шихты проводили при температурах $700, 800, 900$ и $950 \text{ }^\circ\text{C}$ в среде воздуха. На рисунке 3.13 приведено изменение массы с течением времени образца шихты при температуре $900 \text{ }^\circ\text{C}$.

В период прогрева навески в среде аргона сначала происходит незначительное уменьшение массы за счет выхода влаги. При достижении температуры в печи $400 \text{ }^\circ\text{C}$ начинают протекать реакции диссоциации сульфида

железа, масс-спектрометр фиксирует образование небольшого количества SO_2 . При подаче воздуха происходит резкое, практически линейное, уменьшение массы навески за счет протекания реакции окисления сфалерита и остаточного пирита. Также масс-спектрометр фиксирует образование SO_2 . На рисунке 3.14 представлена кривая ионного тока с массовым числом 64, характеризующая образование SO_2 при окислении шихты.

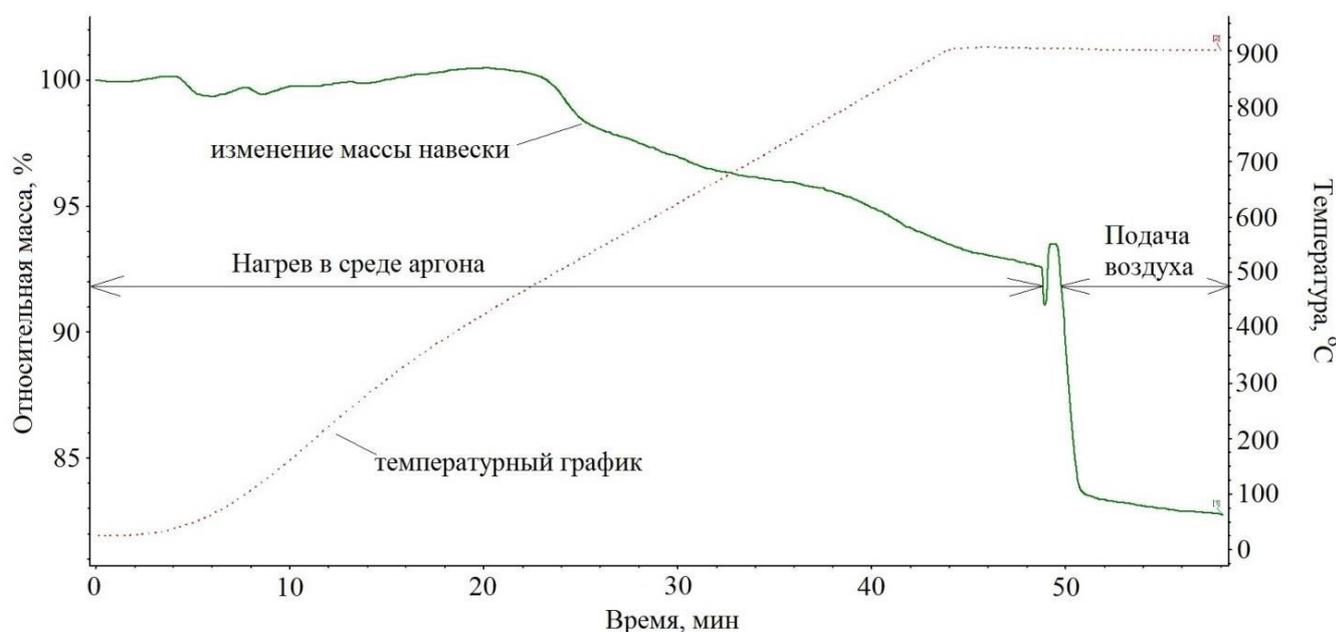


Рис. 3.13 – Изменение массы навески шихты при $t = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$

Поскольку шихта состоит, главным образом, из сульфидов цинка и железа, то необходимо использовать те же формулы и руководствоваться теми же принципами, представленными выше.

Поскольку суммарная доля сфалерита (75 %) и пирита (11 %) в шихте составляет $0,75 + 0,11 = 0,86$, то в соответствии с выражениями (3.3), (3.4) и (3.7) обобщенные коэффициенты для двух реакций могут быть записаны как:

$$\xi = \frac{0,75}{0,86} \cdot 6,07 + \frac{0,11}{0,86} \cdot 2,99 = 5,56; \quad \nu = \frac{0,75}{0,86} \cdot 2,03 + \frac{0,11}{0,86} \cdot 1,36 = 1,91. \quad (3.9)$$

При окислении 100 % шихты максимальное изменение массы составит:

$$\frac{0,75}{0,86} \cdot \frac{\Delta m_{\max}}{m_0} \cdot ZnS + \frac{0,11}{0,86} \cdot FeS_2 = \frac{0,75}{0,86} \cdot 16,5 + \frac{0,11}{0,86} \cdot 33,4 = 18,7 \%$$

На рисунке 3.13 относительное изменение массы при протекании реакции диссоциации сульфида железа и окисления сульфидов цинка и железа кислородом составило около 16 % (от 99 до 83 %), что свидетельствует о практически полном завершении реакции. Аналогичное изменение массы реагирующей шихты наблюдалось и при других температурах, но время полного ее окисления при пониженных температурах увеличивалось.

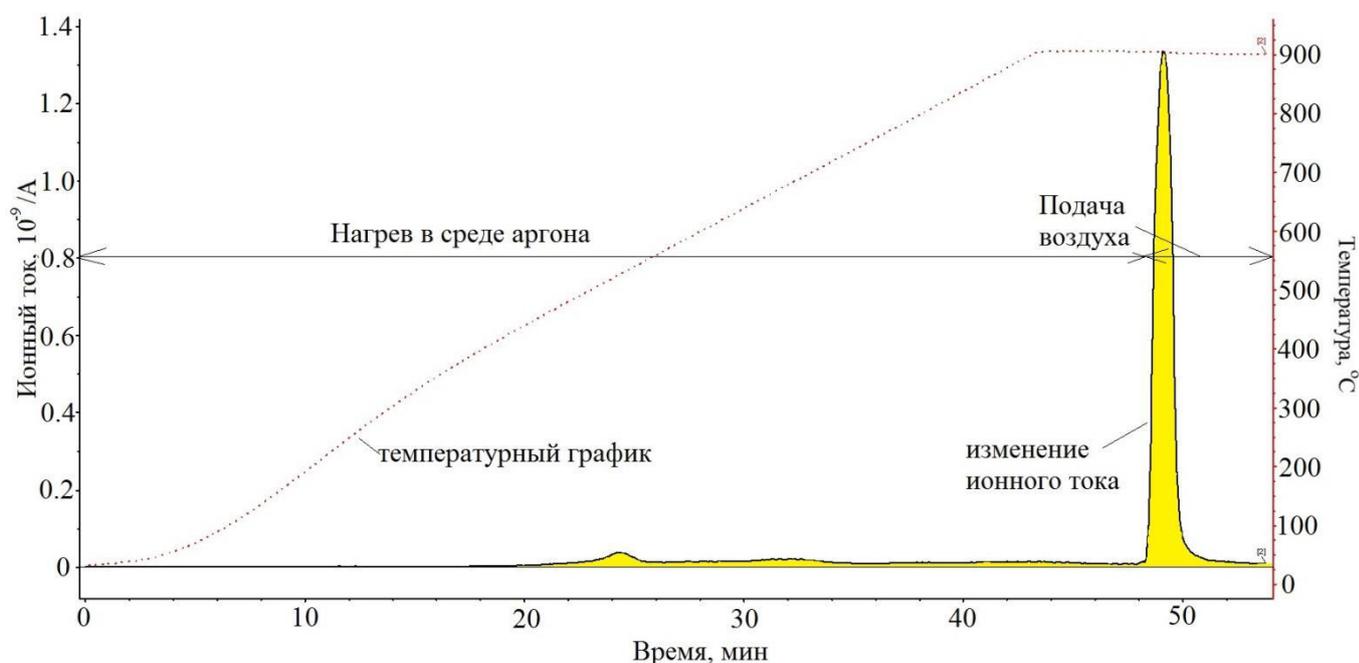


Рис. 3.14 – Изменение ионного тока (SO_2) при обжиге шихты при $t = 900$ °С

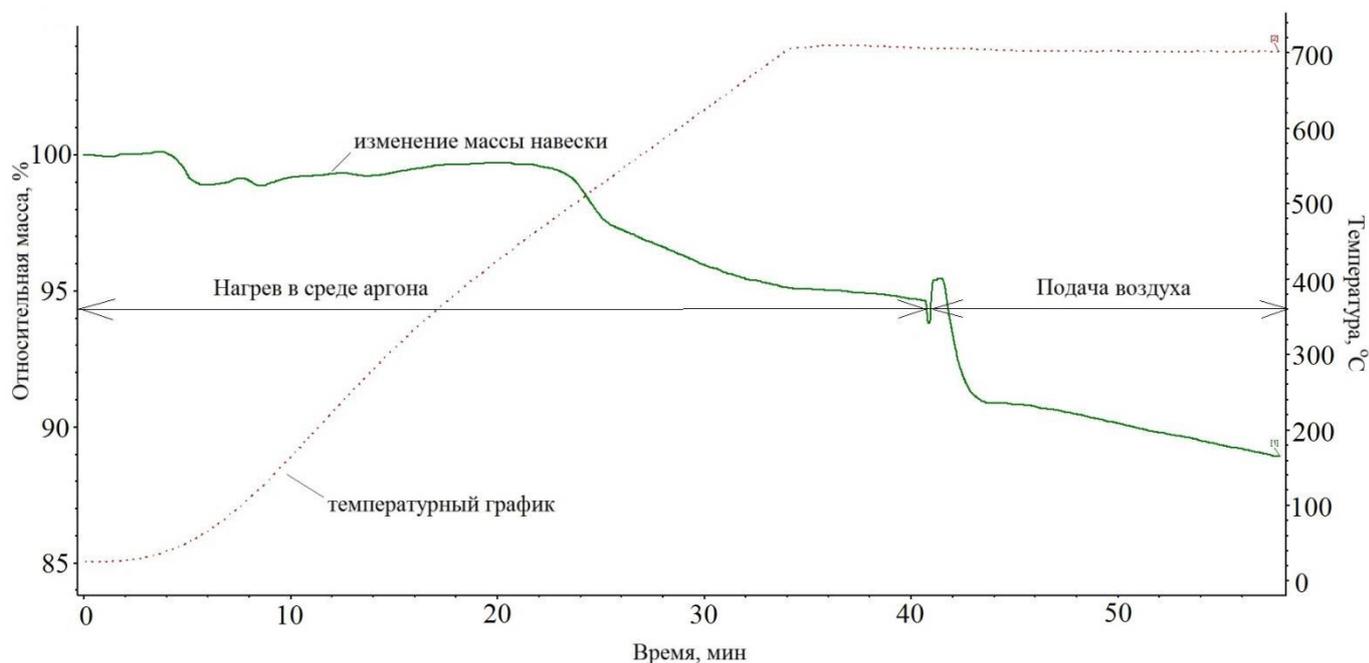
Результаты экспериментов показали (Таблица 3.5), что убыль массы шихты практически не зависит от размера частиц в навеске массой до 10 мг, а влияет только температура обжига.

В таблице 3.5 приведены экспериментальные данные при различных температурах и фракционных составах по убыли массы навесок цинкового концентрата в единицу времени, полученные усреднением их на линейном участке графиков.

Также результаты экспериментов показали, что протекание реакции окисления шихты при 700 °С затруднено, уменьшение массы навески составило около 50 % от исходной массы, а значение эффективной скорости окисления упало почти в 3 раза (Рис. 3.15 и Таблица 3.6) [107]. Поэтому данные, полученные при 700 °С, исключены из рассмотрения.

Таблица 3.5 – Экспериментальные данные по убыли массы шихты в единицу времени

Шихта						
Температура	T	К	973	1073	1173	1223
		°С	700	800	900	950
Диаметр 100 мкм ($m = 10$ мг)						
Поток реагирующего вещества	J	кг/с	$3,5 \cdot 10^{-8}$	$8,0 \cdot 10^{-8}$	$8,9 \cdot 10^{-8}$	–
Диаметр 300 мкм ($m = 10$ мг)						
Поток реагирующего вещества	J	кг/с	$3,3 \cdot 10^{-8}$	$7,8 \cdot 10^{-8}$	$8,8 \cdot 10^{-8}$	$9,0 \cdot 10^{-8}$
Диаметр 515 мкм						
$(m = 10$ мг)						
Поток реагирующего вещества	J	кг/с	$3,5 \cdot 10^{-8}$	$8,0 \cdot 10^{-8}$	$8,8 \cdot 10^{-8}$	–
$(m = 5$ мг)						
Поток реагирующего вещества	J	кг/с	–	$4,0 \cdot 10^{-8}$	$4,4 \cdot 10^{-8}$	–

Рис. 3.15 – Изменение массы навески шихты при $t = 700$ °С

Снимки под микроскопом навесок шихты доказывают, что частицы имеют развитую пористую поверхность как до, так и после обжига (Рис. 3.16) [108].

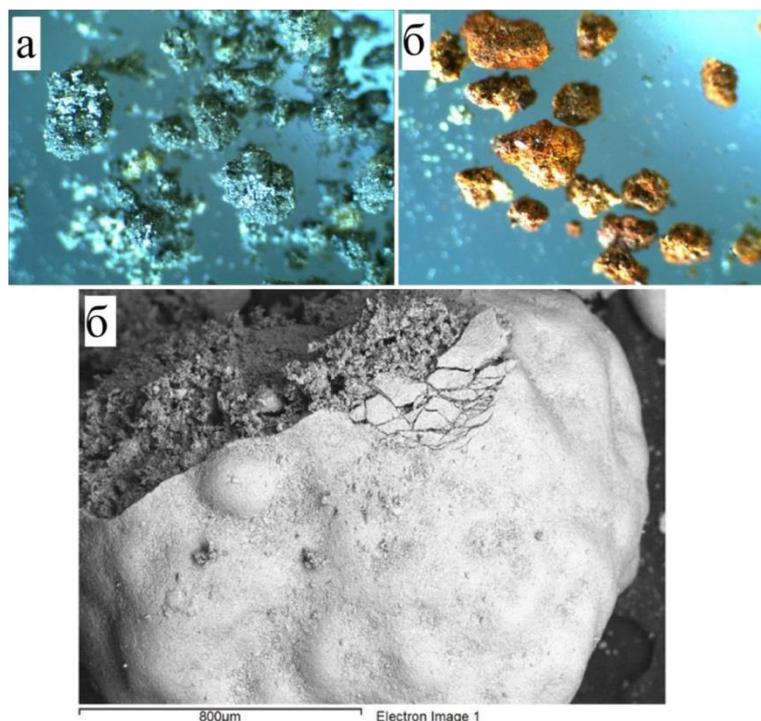


Рис. 3.16 – Частицы шихты: а – до обжига, б – после обжига

В ходе математической обработки опытных данных по обжигу шихты по формуле (3.2) получены следующие результаты (Таблица 3.6).

Таблица 3.6 – Обработка экспериментальных данных по обжигу шихты

Шихта						
Температура	T	К	973	1073	1173	1223
		°C	700	800	900	950
Диаметр 100 мкм ($m = 10$ мг)						
Произведение	$k \cdot S_i$	c^{-1}	53	135	167	–
Диаметр 300 мкм ($m = 10$ мг)						
Произведение	$k \cdot S_i$	c^{-1}	50	134	164	177
Диаметр 515 мкм						
$(m = 10$ мг)						
Произведение	$k \cdot S_i$	c^{-1}	55	133	164	–
$(m = 5$ мг)						
Произведение	$k \cdot S_i$	c^{-1}	–	131	167	–

Из расчетов видно, что произведение $k \cdot S_i$ практически не зависит от начального диаметра частиц и является функцией температуры.

Проведенные эксперименты с навеской массой 5 мг при температурах 800 и 900 °С показали аналогичные результаты.

На рисунке 3.17 представлена обобщенная зависимость натурального логарифма комплекса $k \cdot S_i$ от обратной температуры для частиц шихты различного диаметра, при аппроксимации которой можно получить значения предэкспоненциального множителя и энергии активации:

$$k_0 = \exp(7,2826) = 1455 \text{ с}^{-1}, \quad E_a = 2562,2 \cdot 8,314 = 21302 \text{ кДж/кмоль.}$$

Эффективной константа скорости химического реагирования будет иметь вид:

$$K = k \cdot S_i = k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T}\right) = 1455 \cdot \exp\left(-\frac{21302}{8,314 \cdot T}\right), \text{ с}^{-1}. \quad (3.10)$$

Коэффициент детерминации (среднеквадратичное отклонение) уравнения, представленного на рисунке 3.17, определяет погрешность измерений, которая составляет 0,71 %.

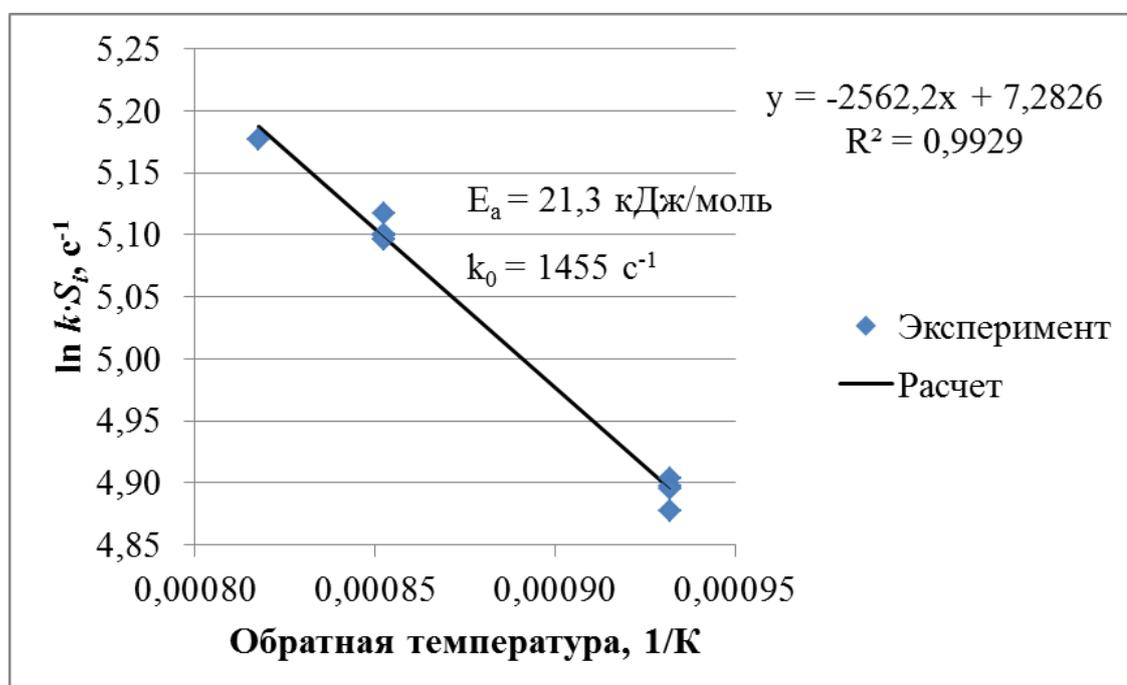


Рис. 3.17 – Зависимость $\ln(k \cdot S_i) = f(1/T)$ для частиц шихты различного диаметра:

линия – расчет по (3.10), точки – эксперимент

При известном комплексе $k \cdot S_i$ и рассчитанном коэффициенте молекулярной диффузии кислорода в азоте (3.6) глубина проникновения кислорода в слой

шихты составляет: $\zeta_0 = \sqrt{\frac{D}{k \cdot S_i}} = 0,00125 \text{ м (1,25 мм)}$.

Исходя из расчетов, можно сделать вывод, что для большинства частиц шихты, подаваемой в печь, глубина проникновения реакции в объем частицы превышает ее диаметр.

Эксперименты с навесками шихты среднего диаметра 100 мкм массой больше 10 мг проводились при температурах 900 °С (20 мг), 800 °С (24 мг) и 700 °С (14 мг). Окисление навески шихты массой 14 мг также как и 10 мг при температуре 700 °С сильно затруднено, поэтому полученные данные исключены из расчета эффективной константы скорости химического реагирования.

Результаты проведенных экспериментов представлены на рисунке 3.18 в сравнении с данными обжига шихты навеской 10 мг.

В таблице 3.7 приведены экспериментальные данные при различных температурах по убыли массы шихты большей массы в единицу времени, полученные усреднением их на линейном участке графиков.

Таблица 3.7 – Экспериментальные данные по убыли массы шихты большей массы в единицу времени

Шихта					
Температура	<i>T</i>	К	923	1073	1173
		°С	700	800	900
Диаметр 100 мкм					
Масса	<i>m</i>₀	мг	(<i>m</i> = 14 мг)	(<i>m</i> = 24 мг)	(<i>m</i> = 20 мг)
Поток реагирующего вещества	<i>J</i>	кг/с	$3,4 \cdot 10^{-8}$	$8,5 \cdot 10^{-8}$	$8,4 \cdot 10^{-8}$

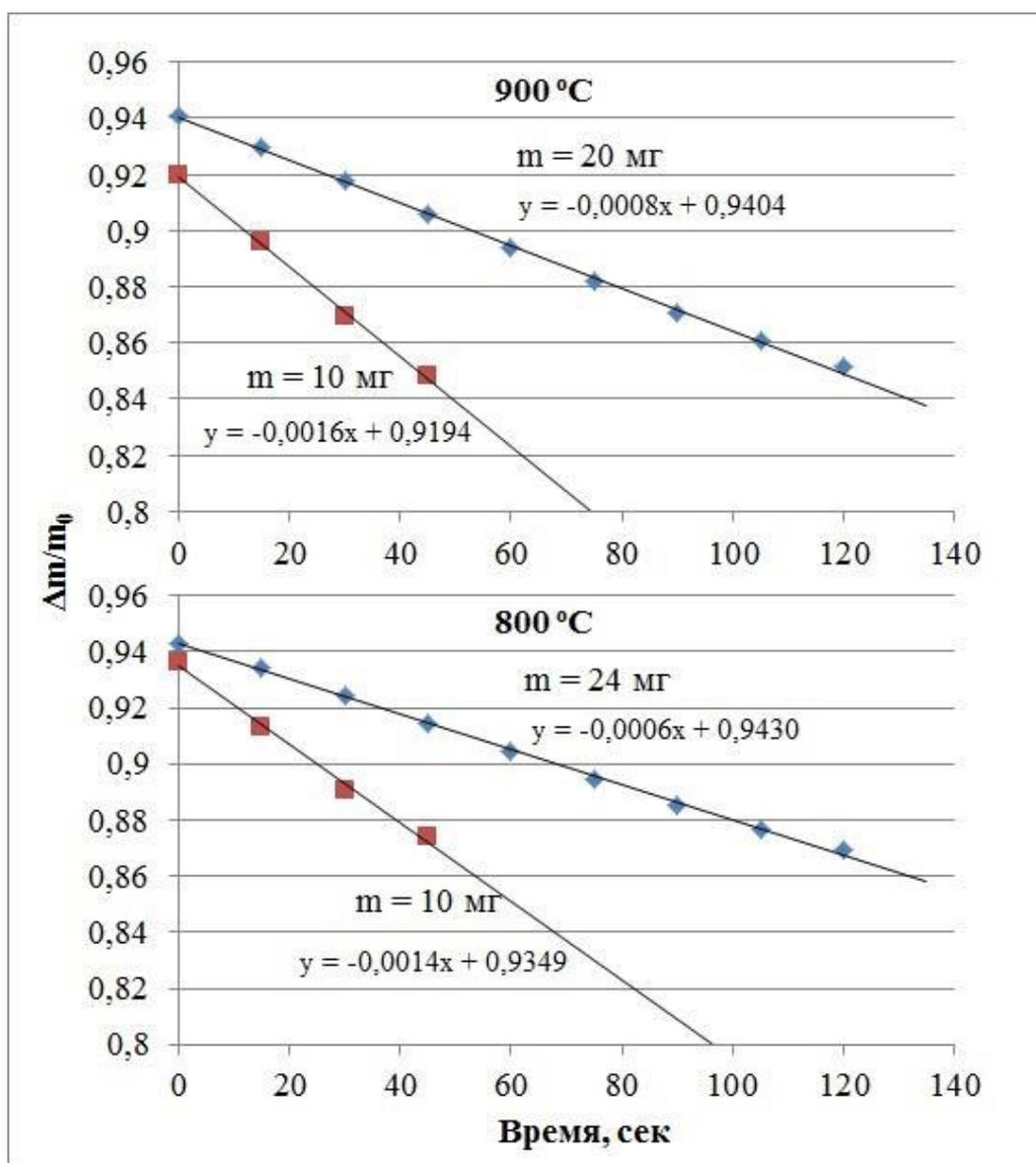


Рис. 3.18 – Убыль массы навесок шихты с различными начальными массами при температурах 900 и 800 °С

В ходе математической обработки опытных данных по обжигу шихты по формуле (3.2) с большей массой навески получены следующие результаты (Таблица 3.8).

Из экспериментальных данных следует, что скорость убыли массы при увеличении массы исходной навески с 10 до 24 мг падает почти в 2 раза. Снижение скорости реагирования обуславливается недостатком кислорода в зоне реакции в слое большей высоты [62].

Таблица 3.8 – Обработка экспериментальных данных по обжигу шихты большей массы

Шихта					
Температура	T	К	923	1073	1173
		°С	700	800	900
Диаметр 100 мкм					
Масса	m_0	мг	$(m = 14 \text{ мг})$	$(m = 24 \text{ мг})$	$(m = 20 \text{ мг})$
Произведение	$k \cdot S_i$	с^{-1}	39	64	83

Изменение относительной концентрации кислорода в слое высотой h определяется по выражению [99]:

$$c = c_0 \cdot \left[\frac{e^{-\frac{x}{\zeta_0}}}{1 + e^{-\frac{2h}{\zeta_0}}} + \frac{e^{\frac{x}{\zeta_0}}}{1 + e^{\frac{2h}{\zeta_0}}} \right]. \quad (3.11)$$

Здесь c – относительная концентрация кислорода в слое шихты; c_0 – начальная относительная концентрация кислорода в слое шихты; x – координата h – толщина слоя шихты, м.

Глубина проникновения кислорода в слой (ζ_0) в данной формуле содержит в неявном виде скорость химического реагирования и удельную внутреннюю поверхность.

Интегрирование (3.9) по высоте слоя в пределах от 0 до h позволяет определить среднюю относительную концентрацию кислорода:

$$\bar{c} = \frac{c_0}{h} \cdot \int_0^h \left[\frac{e^{-\frac{x}{\zeta_0}}}{1 + e^{-\frac{2h}{\zeta_0}}} + \frac{e^{\frac{x}{\zeta_0}}}{1 + e^{\frac{2h}{\zeta_0}}} \right] dx = \frac{c_0 \cdot \zeta_0}{h} \cdot \left[\frac{1 - e^{-\frac{x}{\zeta_0}}}{1 + e^{-\frac{2h}{\zeta_0}}} + \frac{e^{\frac{x}{\zeta_0}} - 1}{1 + e^{\frac{2h}{\zeta_0}}} \right]. \quad (3.12)$$

На рисунке 3.19 представлены результаты расчетов по формулам (3.11) и (3.12) с учетом средней высоты слоя равной $h = 3$ мм, а также глубины проникновения равной $\zeta_0 = 1,7$ мм.

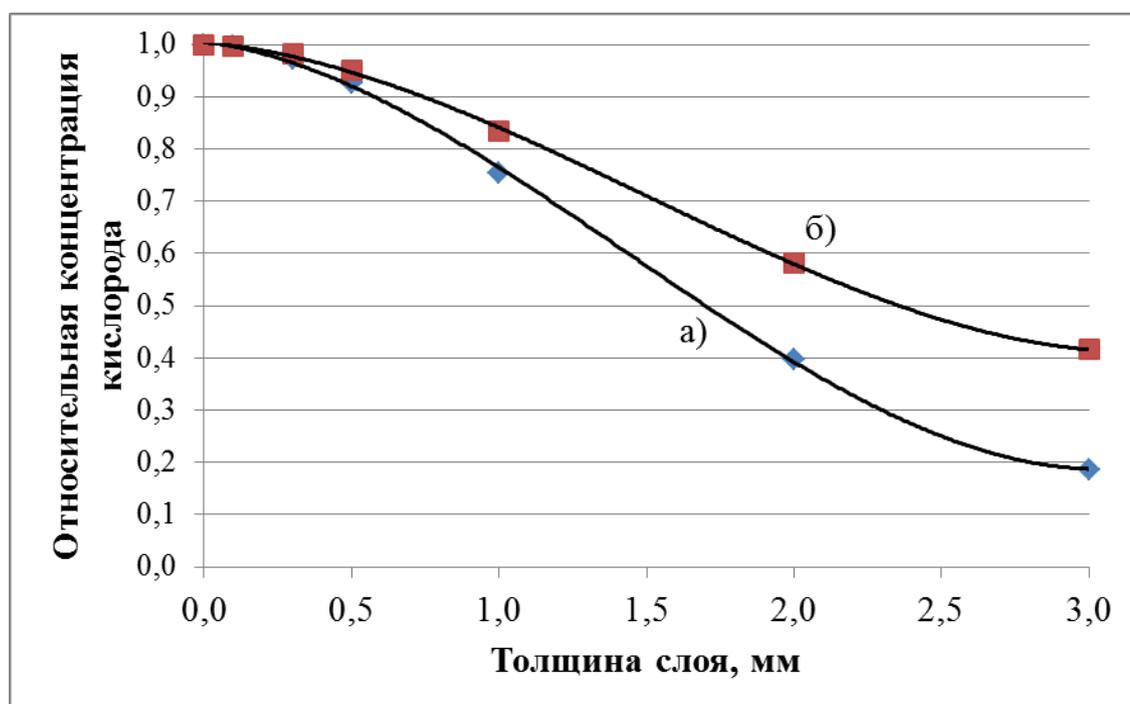


Рис. 3.19 – а) Распределение кислорода в слое шихты высотой 3 мм
 б) Значение средней относительной концентрации кислорода
 в зависимости от толщины слоя шихты

3.5. Обобщение полученных экспериментальных и расчетных данных

На рисунке 3.20 и 3.21 приведено сопоставление констант скорости реагирования и зависимостей $\ln(k \cdot S_i) = f(1/T)$ сфалерита, пирита и шихты.

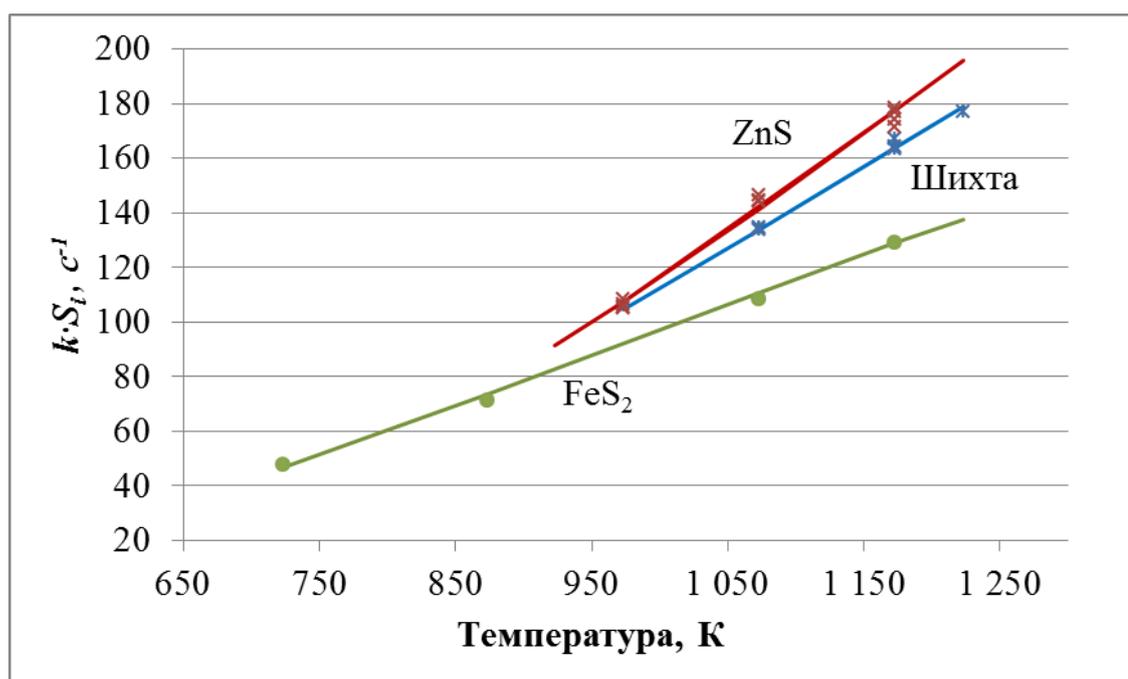


Рис. 3.20 – Сопоставление констант скорости реагирования:
 линии – расчет по эмпирическим зависимостям, точки – эксперимент

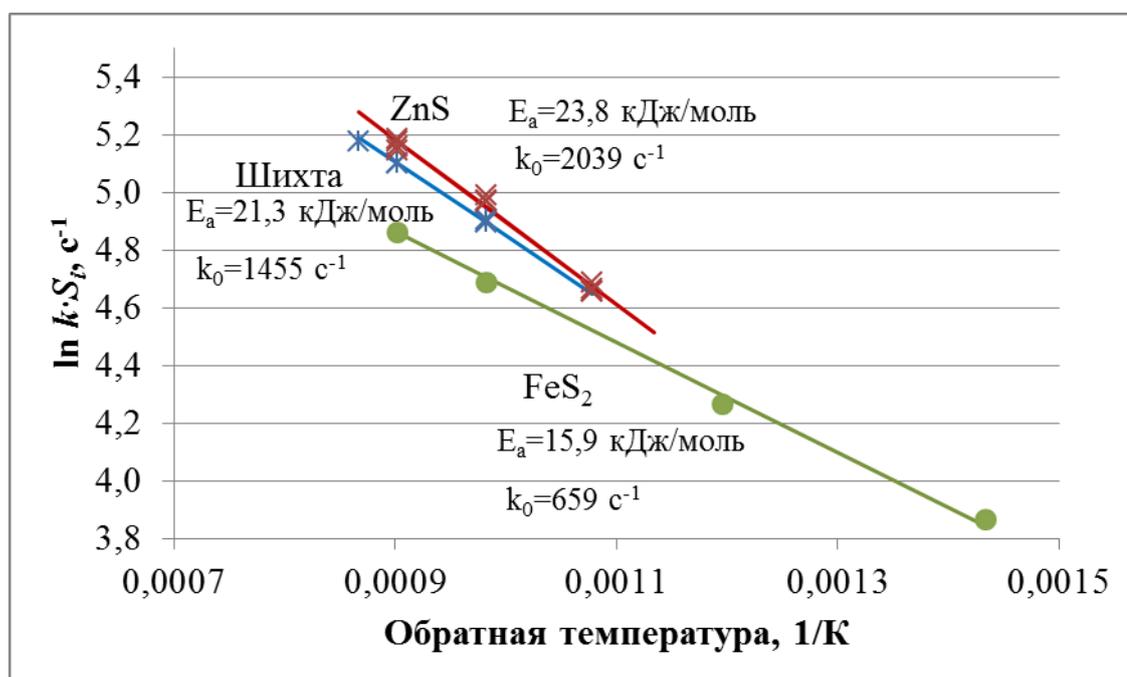


Рис. 3.21 – Сопоставление зависимостей $\ln(k \cdot S_i) = f(1/T)$:

линии – расчет по эмпирическим зависимостям, точки – эксперимент

Ниже приведены данные по энергии активации цинковых концентратов, полученные разными авторами (Таблица 3.9).

Таблица 3.9 – Сравнительный анализ энергии активации цинковых концентратов

Энергия активации, кДж/моль	Условия					Работа
	Zn,%	Fe,%	Pb,%	S,%	Метод	
21	50,2	7,4	1,2	32,9	ТГА	Текущая работа
25	50,4	8,5	0,4	35,1	КС	[7]
25-38	54,9	6,0	2,6	32,6	КС	[8]
96	48,3	19,3	–	31,8	ТГА	[1]
63-161	–	–	–	–	ТГА	[2]
69-86	54,2	10,8	–	33,6	ТГА	[3]
87	56,2	5,0	0,8	33,2	КС	[9]
169	46,4	11,9	0,7	30,9	КС	[10]
193	28,4	21,4	0,5	26,5	ТГА	[4]
222-314	55,7	5,5	–	30,7	КС	[11]
296-318	61,6	3,3	3,9	30,7	ТГА	[5]

Огромный разброс значений энергии активации обусловлен предположительно различными условиями проведения экспериментов, химическим и гранулометрическим составом, а самое главное – методом обработки экспериментальных данных.

3.6. Газообразование в кипящем слое при обжиге цинкового концентрата

Уравнение изменения концентрации кислорода по высоте кипящего слоя можно представить в традиционном виде [109-114]:

$$V \cdot w \cdot \frac{dC_{O_2}}{dx} = -(k \cdot S_i \cdot \zeta_0) \cdot F \cdot C_{O_2}, \text{ кг/с.} \quad (3.13)$$

Здесь V – объём слоя, м^3 ; w – скорость газов в топке, м/с ; $(k \cdot S_i \cdot \zeta_0)$ – константа скорости химического реагирования шихты, отнесенная к внешней поверхности частиц, м/с ; F – внешняя поверхность частиц в объёме слоя, м^2 .

Разделив правую и левую часть уравнения (3.13) на объём слоя, получим:

$$w \cdot \frac{dC_{O_2}}{dx} = -(k \cdot S_i \cdot \zeta_0) \cdot S \cdot C_{O_2}, \text{ кг}/(\text{м}^3 \text{с}). \quad (3.14)$$

Здесь S – внешняя удельная поверхность частиц шихты в слое огарка, составляющего основную массу кипящего слоя, $\text{м}^2/\text{м}^3$. Внешняя удельная поверхность связана с удельной массовой концентрацией z горючих в объёме кипящего слоя следующим соотношением [109]:

$$S = \frac{6}{\delta} \cdot \frac{\rho_c \cdot (1-\varepsilon)}{\rho_u} \cdot z.$$

Учитывая, что глубина проникновения реакции в объём частицы составляет $\zeta_0 = \frac{\delta}{6}$, преобразуем правую часть уравнения (3.14) к виду

$$w \cdot \frac{dC_{O_2}}{dx} = -(k \cdot S_i) \cdot \frac{\delta}{6} \cdot \frac{6}{\delta} \cdot \frac{\rho_c \cdot (1-\varepsilon)}{\rho_u} \cdot z \cdot C_{O_2} = -(k \cdot S_i) \cdot \sigma \cdot z \cdot C_{O_2}, \text{ кг/с} \quad (3.15)$$

где $\sigma = \frac{\rho_c \cdot (1-\varepsilon)}{\rho_u}$.

Здесь ρ_c – истинная плотность огарка, кг/м^3 ; $\rho_{ш}$ – истинная плотность шихты, кг/м^3 , ε – порозность слоя.

В качестве начальной концентрации кислорода C_0 принимается содержание кислорода в дутьевом воздухе (от 21%). Интегрируя (3.15) от $x = 0$ до текущего значения, получим распределение концентрации кислорода по высоте слоя в зависимости от массовой концентрации шихты в объёме кипящего слоя огарка:

$$C_{O_2} = C_0 \cdot \exp\left(-\frac{(k \cdot S_i) \cdot \sigma \cdot z \cdot x}{w}\right), \text{кг/м}^3. \quad (3.16)$$

При конечной высоте слоя H концентрация кислорода на выходе из слоя будет равна:

$$C_K = C_0 \cdot \exp\left(-\frac{(k \cdot S_i) \cdot \sigma \cdot z \cdot H}{w}\right), \text{кг/м}^3. \quad (3.17)$$

Отношение конечной и начальной концентраций связано с коэффициентом избытка воздуха очевидным соотношением:

$$\frac{C_K}{C_0} = \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right).$$

Подставляя данное соотношение в (3.17), получим выражение для определения коэффициента избытка воздуха на выходе из слоя в зависимости от режимных параметров и высоты слоя H :

$$\frac{1}{\alpha} = \left[1 - \exp\left(-\frac{(k \cdot S_i) \cdot \sigma \cdot z \cdot H}{w}\right)\right]. \quad (3.18)$$

Расход воздуха G , $\text{м}^3/\text{с}$, подаваемого на горение, может быть записан либо через скорость воздуха u , м/с , приведенную к нормальным условиям, и площадь сечения печи кипящего слоя F_c , м^2 , либо через величину теоретически необходимого количества воздуха V^0 , $\text{м}^3/\text{кг}$, и его избыток [109]:

$$G = u \cdot F_c = B \cdot \alpha \cdot V^0.$$

Из данного равенства можно выразить расход шихты, выгорающей на 1 м^2 сечения печи, в зависимости от концентрации горючих веществ в слое (z), и

подставляя при этом в него выражение (3.18), получим зависимость удельного расхода шихты от режимных параметров:

$$\frac{B}{F} = \frac{u}{\alpha \cdot V^0} = \frac{u}{V^0} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{(k \cdot S_i) \cdot \sigma \cdot z \cdot H}{w}\right) \right], \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}). \quad (3.19)$$

Поскольку зависимым параметром в данном уравнении является концентрация горючих в слое, целесообразно выразить ее как функцию от режимных параметров:

$$z = \frac{w \cdot \ln\left(1 - \frac{B \cdot V^0}{F_c \cdot u}\right)}{(k \cdot S_i) \cdot \sigma \cdot H}. \quad (3.20)$$

На рисунке 3.22 приведены рассчитанные по формуле (3.20) зависимости удельной массовой концентрации горючих веществ в слое от расхода шихты и концентрации кислорода в дутье.

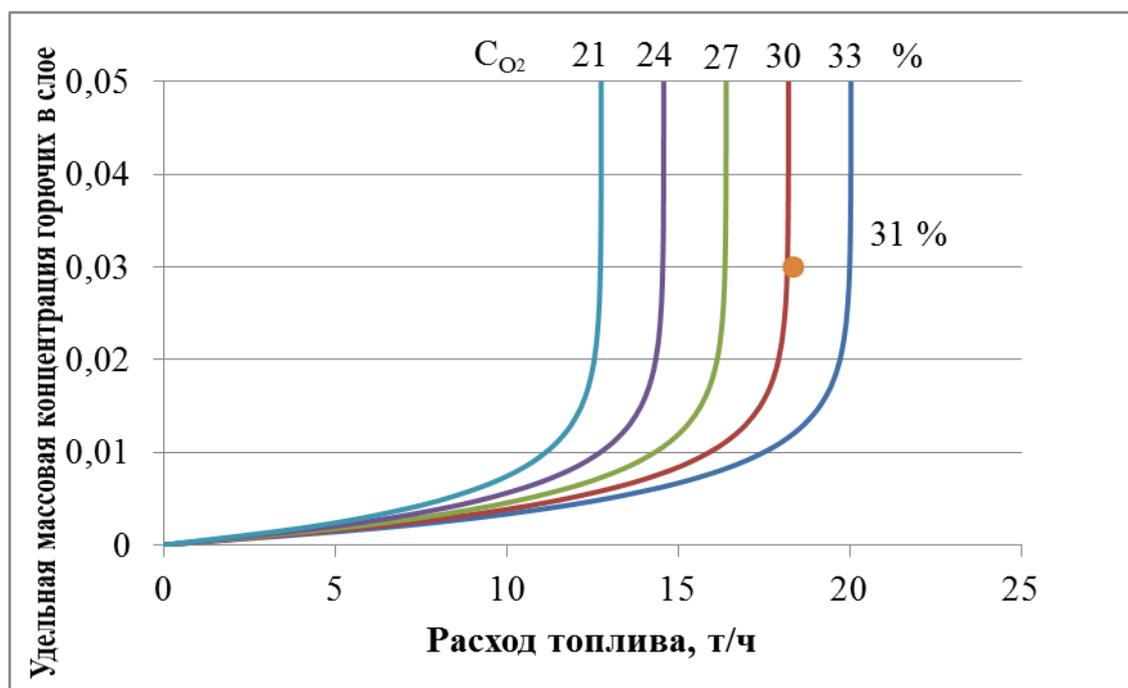


Рис. 3.22 – Зависимость удельной массовой концентрации горючих веществ в слое от расхода шихты и концентрации кислорода в дутье:

линии – расчет по зависимости (3.20), точка – эксперимент

Идеальный процесс обжига заключается в окислении наибольшего количества шихты с минимальным остатком горючих веществ в кипящем слое.

Это достигается за счет увеличения концентрации кислорода в дутье до определенного предела (экономически обоснованного). Так, например, из расчетов следует, что при расходе шихты 18 т/час и концентрации кислорода в дутье более 30 % средняя концентрация горючих в слое составляет около 3 %. Рабочие данные печи №2 ПАО «ЧЦЗ» хорошо соотносятся с расчетными – при расходе 17,5 т/ч и концентрации кислорода 31% содержание горючих в слое по среднемесячным анализам технологических показателей составляет 3%.

3.7. Выводы по главе 3

1. Экспериментально показано, что при окислении частиц сфалерита, пирита и шихты с размерами меньше глубины проникновения кислорода в слой скорость химического реагирования не зависит от диаметра частиц, а зависит только от температуры. Это означает, что реакция окисления идет во внутрекинетиической области, когда реагирует весь объём частицы.
2. Получены кинетические характеристики с учетом внутрипористого реагирования мелкодисперсных частиц сульфидного цинкового концентрата, а также чистых веществ – сфалерита и пирита.
3. Предложена математическая модель газообразования в кипящем слое, которая достаточно хорошо описывает зависимость удельной массовой концентрации горючих в слое от расхода шихты и концентрации кислорода в дутье.

ГЛАВА 4. ВЛИЯНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЖИГА НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ

4.1. Моделирование переходных процессов в кипящем слое

Для разработки регулятора температуры кипящего слоя путем изменения расхода цинкового концентрата необходимо определить динамику объекта регулирования (печи), а именно его инерционность (постоянные времени интегрирования и коэффициент усиления объекта). Для этого необходимо разработать математическую модель процесса обжига на основании системы уравнений теплового и материального баланса [80,114-116].

При моделировании использованы следующие условия.

1. Изотермичность слоя ввиду практически идеального перемешивания горючих частиц в объеме слоя.

2. Скорость химического реагирования шихты с кислородом воздуха равна экспериментально полученной с навеской 10 мг. Константа скорости окисления шихты рассчитывается по выражению (3.10) [95,108,117,118]:

$$k \cdot S_i = 1455 \cdot \exp\left(-\frac{21302}{8,314 \cdot T}\right), \text{ c}^{-1},$$

где k – константа скорости химического реагирования шихты, отнесенная к внешней поверхности частицы, $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{c})$; S_i – удельная внутренняя поверхность реагирования шихты, m^2/m^3 .

3. Выделяющаяся от реакции окисления шихты теплота расходуется на испарение влаги, подогрев поступающей в печь шихты и продуктов сгорания до температуры слоя и теплопередачу поверхностям теплообмена (кессонам).

Введем безразмерную концентрацию горючих в слое как отношение массы горючих в слое к массе самого слоя:

$$z = \frac{n \cdot \pi \cdot \delta^3 \cdot \rho_u}{6 \cdot V \cdot \rho_c \cdot (1 - \varepsilon)}.$$

Здесь z – безразмерная концентрация горючих в слое; n – количество горючих частиц в слое; δ – диаметр горючих частиц, м; ρ_u , ρ_c – плотность частиц шихты и слоя (огарка) соответственно, kg/m^3 ; V – объем слоя, m^3 ; ε – порозность слоя.

Внешняя удельная (отнесенная к единице объема слоя) поверхность реагирования горючих частиц определяется соотношением:

$$S = \frac{n \cdot \pi \cdot \delta^2}{V} = \frac{6 \cdot \rho_c \cdot (1 - \varepsilon)}{\delta \cdot \rho_u} \cdot z = \frac{6}{\delta} \cdot \sigma \cdot z, \text{ м}^2/\text{м}^3, \quad (4.1)$$

где $\sigma = \frac{\rho_c \cdot (1 - \varepsilon)}{\rho_u}$.

Удельный поток реагирующей шихты равен:

$$j = \nu \cdot (k \cdot S_i \cdot \zeta_0) \cdot S \cdot \overline{C_{O_2}}, \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с}). \quad (4.2)$$

Здесь: $\zeta_0 = \frac{\delta}{6}$ – глубина проникновения реакции, м; ν – коэффициент реакции окисления цинкового концентрата (для шихты Челябинского цинкового завода $\nu = 1,91$ (3.9)); $\overline{C_{O_2}}$ – средняя концентрация кислорода в слое, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Средняя по высоте слоя концентрация кислорода определяется интегрированием выражения (3.16) и делением на высоту слоя:

$$\overline{C_{O_2}} = C_0 \cdot \int_0^H \exp\left(-\frac{(k \cdot S_i) \cdot \sigma \cdot z \cdot x}{w}\right) dx / H = \frac{C_0 \cdot w}{(k \cdot S_i) \cdot \sigma \cdot z \cdot H} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{(k \cdot S_i) \cdot \sigma \cdot z \cdot H}{w}\right)\right), \text{ кг}/\text{м}^3.$$

Подставляя (4.1) в (4.2) и вводя туда выражения для глубины проникновения реакции, получим выражение для удельного потока реагирующей шихты:

$$j = \nu \cdot (k \cdot S_i) \cdot \frac{\delta}{6} \cdot \frac{6}{\delta} \cdot \frac{\rho_c \cdot (1 - \varepsilon)}{\rho_u} \cdot z \cdot \overline{C_{O_2}} = \nu \cdot (k \cdot S_i) \cdot \sigma \cdot z \cdot \overline{C_{O_2}} = j^* \cdot z, \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с}), \quad (4.3)$$

где j^* – удельный поток реагирующей шихты, отнесенный к концентрации горючих веществ, $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$.

При указанных предположениях система нестационарных уравнений для описания переходного процесса в печи кипящего слоя будет иметь следующий вид:

$$M \cdot c_c \cdot \frac{dt_c}{d\tau} = V \cdot j^* \cdot z \cdot Q_n^p - B \cdot \left(1 - \frac{W^p}{100}\right) \cdot c_u \cdot (t_c - t_u) - B \cdot \frac{W^p}{100} \cdot \chi - u \cdot F_c \cdot c_c \cdot (t_c - t_e) - k_n \cdot F_n \cdot (t_c - t_n), \quad (4.4)$$

$$V \cdot \rho_c \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \frac{dz}{d\tau} = B \cdot \left(1 - \frac{W^p}{100} - \frac{A^p}{100} \right) - V \cdot j^* \cdot z. \quad (4.5)$$

Здесь M – масса кипящего слоя, кг; c_c , $c_{ш}$ – теплоемкость слоя и шихты соответственно, кДж/(кг·К); c_2 – теплоемкость газов, кДж/(м³·К); t_c – температура слоя, °С; $t_{ш}$, $t_в$, t_n – начальная температура шихты, воздуха и поверхностей нагрева соответственно, °С; τ – время, с; Q_n^p – низшая рабочая теплота сгорания шихты, кДж/кг; B – расход шихты, кг/с; W^p – влажность шихты, %; χ – теплота парообразования, кДж/кг; u – скорость газов в топке при нормальных условиях, м/с; F_c , F_n – площадь сечения топки и площадь поверхностей теплообмена соответственно, м²; k_n – коэффициент теплопередачи от слоя к поверхностям теплообмена, кВт/(м²·К); A^p – зольность шихты в рабочем состоянии, %.

Масса и объем кипящего слоя, входящие в уравнения (4.4) и (4.5), связаны с площадью поперечного сечения топки F_c и высотой кипящего слоя H очевидным соотношением:

$$M = H \cdot F_c \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \rho_c.$$

Упростим получившиеся уравнения теплового (4.4) и материального (4.5) баланса для получения выражения, позволяющего представить влияние основных параметров на переходный процесс. Горение частиц шихты и испарение влаги будем рассматривать как один процесс, характеризуемый ее низшей теплотой сгорания. Пренебрежем теплотой, вносимой в топку воздухом, теплоносителем, поступающим в охлаждающие кессоны, и теплотой, затраченной на нагрев частиц, поступающих в слой. В этом случае уравнения преобразуются к виду:

$$M \cdot c_c \cdot \frac{dt_c}{d\tau} = V \cdot j^* \cdot z \cdot Q_n^p - u \cdot F_c \cdot c_2 \cdot t_c - k_n \cdot F_n \cdot t_c, \quad (4.6)$$

$$M \cdot \frac{dz}{d\tau} = B - V \cdot j^* \cdot z. \quad (4.7)$$

Выразив из уравнения (4.7) концентрацию горючих веществ в слое как

$$z = \frac{B}{V \cdot j^*} - \frac{M}{V \cdot j^*} \cdot \frac{dz}{d\tau}$$

и подставив ее в уравнение (4.6), получим уравнение теплового баланса в виде, удобном для качественного анализа:

$$M \cdot c_c \cdot \frac{dt_c}{d\tau} = Q_n^p \cdot \left(B - M \cdot \frac{dz}{d\tau} \right) - w \cdot F_c \cdot c_z \cdot t_c - k_n \cdot F_n \cdot t_c. \quad (4.8)$$

Смысл уравнения (4.8) в следующем. В стационарном режиме $\frac{dt_c}{d\tau} = \frac{dz}{d\tau} = 0$, вся теплота $B \cdot Q_n^p$ затрачивается на нагрев продуктов сгорания и передается охлаждающим поверхностям. В переходных режимах (например, при уменьшении расхода шихты) сгорает не только поступающий концентрат, но и часть горючих, аккумулированных в слое (при этом $\frac{dz}{d\tau} < 0$). При увеличении расхода шихты горючие, наоборот, накапливаются в слое ($\frac{dz}{d\tau} > 0$), т. е. в слое сгорает меньше концентрата, чем его туда подается. Если производная $\frac{dz}{d\tau}$ велика, т.е. величина $V \cdot \rho_c \cdot \frac{dz}{d\tau}$ сравнима с B , то влияние изменения концентрации горючих веществ в слое на изменение температуры слоя может быть существенным.

Для решения системы уравнений (4.6) и (4.7) примем начальные условия:

$$\tau = 0, \quad z_0 = \frac{B_0}{V \cdot j^*}, \quad t_0 = \frac{Q_n^p \cdot B_0}{u \cdot F_c \cdot c_z + k_n \cdot F_n}.$$

Приведем уравнения (4.6) и (4.7) к безразмерному виду, для этого введем безразмерную температуру $\mathcal{G} = \frac{t_c}{t_0}$ и безразмерное время $\xi = \frac{B \cdot \tau}{V \cdot \rho_c \cdot (1 - \varepsilon)} = \frac{B \cdot \tau}{M}$.

Тогда система уравнений будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \sigma \cdot \frac{d\mathcal{G}}{d\xi} &= z - \psi \cdot \mathcal{G}, \\ \frac{dz}{d\xi} &= 1 - \phi \cdot z. \end{aligned} \quad (4.9)$$

$$\text{Здесь: } \phi = \frac{V \cdot j^*}{B}, \quad \sigma = \frac{B \cdot c_c \cdot t_0}{V \cdot j^* \cdot Q_n^p}, \quad \psi = \frac{(u \cdot F_c \cdot c_z + k_n \cdot F_n) \cdot t_0}{V \cdot j^* \cdot Q_n^p}.$$

$$\text{Начальные условия: } \xi = 0, \quad z_0 = \frac{1}{\phi} = \frac{B_0}{V \cdot j^*}, \quad \mathcal{G}_0 = \frac{1}{\phi \cdot \psi} = \frac{Q_n^p \cdot B_0}{(u \cdot F_c \cdot c_z + k_n \cdot F_n) \cdot t_0}.$$

Решение системы уравнений (4.9) имеет следующий вид:

$$g = \left(g_0 + \frac{z_0 - \sigma / \psi}{\sigma \cdot \phi - \psi} \right) \cdot \exp\left(-\frac{\psi}{\sigma} \cdot \xi\right) + \frac{\sigma / \psi - 1 / \phi}{\sigma \cdot \phi - \psi} + \frac{1 / \phi - z_0}{\sigma \cdot \phi - \psi} \cdot \exp(-\phi \cdot \xi), \quad (4.10)$$

$$z = \left(z_0 - \frac{1}{\phi} \right) \cdot \exp(-\phi \cdot \xi) + \frac{1}{\phi}. \quad (4.11)$$

Подставляя параметры работы печи кипящего слоя №2 ПАО «ЧЦЗ» в выражения (4.10) и (4.11) получим кривые изменения концентрации горючих и температуры слоя с течением времени при уменьшении расхода подаваемой в печь шихты с 4,8 до 4,7 кг/с (Рис. 4.1).

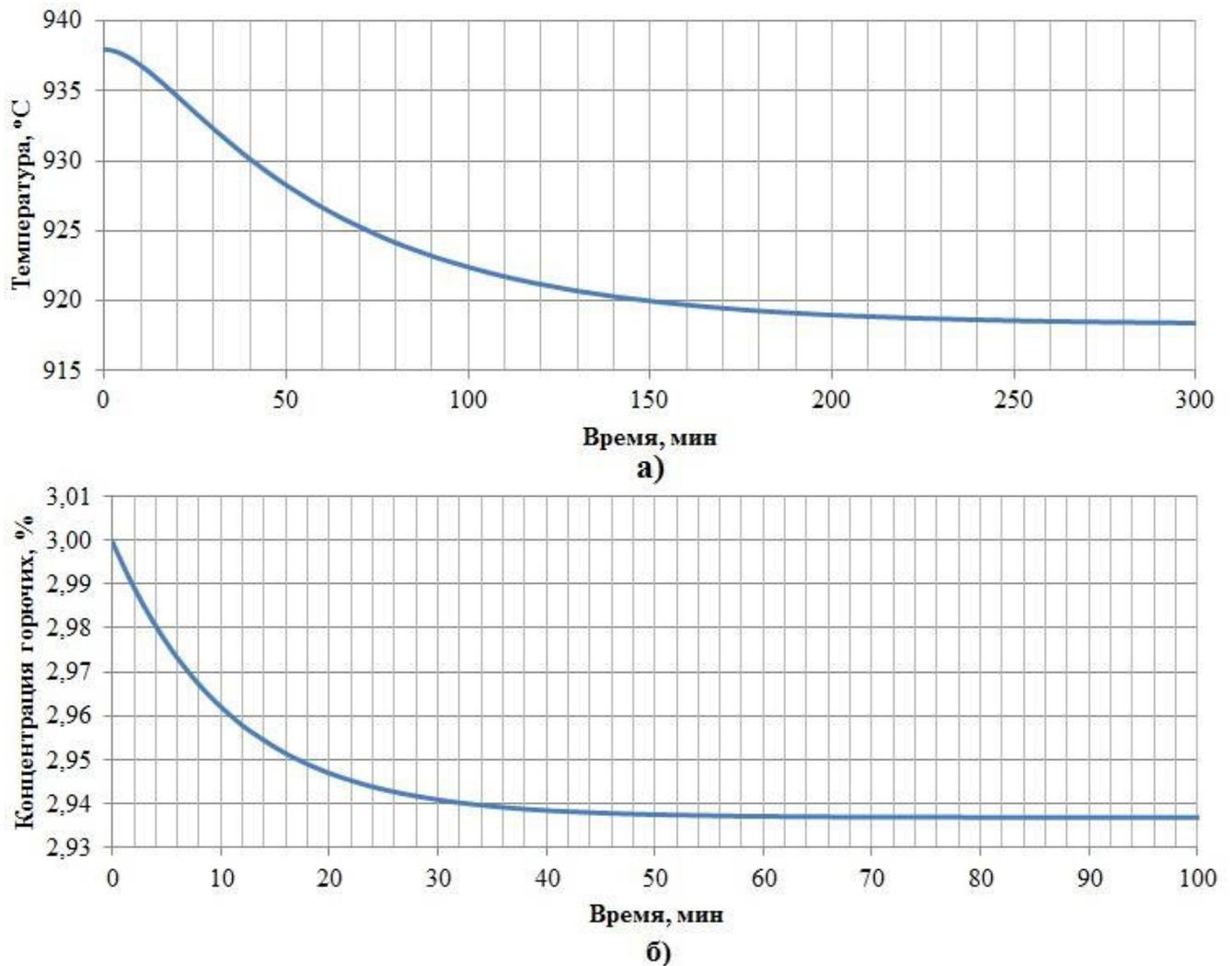


Рис. 4.1 – а) Изменение температуры слоя с течением времени по (4.10);
б) Изменение концентрации горючих в слое с течением времени по (4.11)

Для оценки постоянной времени кипящего слоя [82] продифференцируем уравнение (4.6) по времени:

$$M \cdot c_c \cdot \frac{d^2 t_c}{d\tau^2} = V \cdot j^* \cdot z \cdot Q_n^p \cdot \frac{dz}{d\tau} - (u \cdot F_c \cdot c_z + k_n \cdot F_n) \cdot \frac{dt_c}{d\tau}. \quad (4.12)$$

Считая поток j^* постоянным, выразим из уравнения (4.8) производную $\frac{dz}{d\tau}$:

$$\frac{dz}{d\tau} = \frac{1}{M \cdot Q_n^p} \cdot \left[Q_n^p \cdot B - M \cdot c_c \cdot \frac{dt_c}{d\tau} - (u \cdot F_c \cdot c_z + k_n \cdot F_n) \cdot dt_c \right].$$

Подставив ее в (4.12), получим уравнение второго порядка для изменения температуры кипящего слоя в виде:

$$\begin{aligned} \frac{M \cdot c_c \cdot \rho_c \cdot (1-\varepsilon)}{j^*} \cdot \frac{d^2 t_c}{d\tau^2} + \left[M \cdot c_c + \frac{\rho_c \cdot (1-\varepsilon)}{j^*} \cdot (u \cdot F_c \cdot c_z + k_n \cdot F_n) \right] \cdot \frac{dt_c}{d\tau} = \\ = Q_n^p \cdot B - (u \cdot F_c \cdot c_z + k_n \cdot F_n) \cdot t_c. \end{aligned} \quad (4.13)$$

При ступенчатом изменении расхода шихты в момент времени $\tau = 0$ с B_0 до B температура возрастает за продолжительный отрезок времени с t_0 до t_c . Учитывая, что до внесения возмущения в стационарном состоянии наблюдалось равенство тепловыделений и теплоотвода

$$Q_n^p \cdot B_0 - (u \cdot F_c \cdot c_z + k_n \cdot F_n) \cdot t_0 = 0, \quad (4.14)$$

вычтем уравнение (4.14) из (4.13) и, введя традиционно используемые обозначения при описании свойств объектов автоматического регулирования $B - B_0 = x$ и $t_c - t_0 = y$, получим уравнение многоемкостного статического объекта [82] (кипящего слоя) в виде:

$$T_1 \cdot T_2 \cdot \frac{d^2 y}{d\tau^2} + (T_1 + T_2) \cdot \frac{dy}{d\tau} + y = K_y \cdot x, \quad (4.15)$$

в котором постоянная времени включает в себя два характерных слагаемых:

$$T_1 = \frac{M \cdot c_c}{w \cdot F_c \cdot c_z + k_n \cdot F_n} = \frac{H \cdot (1-\varepsilon) \cdot \rho_c \cdot c_c}{u \cdot c_z + k_n \cdot F_n / F_c}, \text{ с}, \quad (4.16)$$

$$T_2 = \frac{\rho_c \cdot (1-\varepsilon)}{j^*} = \frac{\rho_c \cdot (1-\varepsilon)}{v \cdot (k \cdot S_i) \cdot C_{O_2}} \cdot \frac{\rho_{u_0}}{\rho_c \cdot (1-\varepsilon)} = \frac{\rho_{u_0}}{v \cdot (k \cdot S_i) \cdot C_{O_2}}, \text{ с}. \quad (4.17)$$

Первое слагаемое (4.16) определяет соотношение между затратами теплоты на нагрев слоя с одной стороны и на нагрев продуктов сгорания и теплоносителя в трубах с другой. Расчет второй составляющей постоянной времени по соотношению (4.17) затруднен хотя бы из-за того, что, как правило, удельная поверхность частиц в слое либо средний диаметр частиц и удельный поток выгорающего вещества с достаточной точностью не известны [77]. Используя

соотношение между расходом шихты и концентрацией горючих веществ в слое для начального стационарного состояния $B_0 = V \cdot j^* \cdot z_0$, можно записать:

$$T_2 = \frac{\rho_c \cdot (1 - \varepsilon)}{j^*} = \frac{V \cdot \rho_c \cdot (1 - \varepsilon)}{B_0} \cdot z_0 = \frac{M \cdot z_0}{B_0}, \text{ с.} \quad (4.18)$$

По данному выражению можно найти вторую составляющую постоянной времени T_2 , используя полученные из эксперимента данные.

Постоянные времени, полученные по выражениям (4.16) и (4.18) для печи кипящего слоя №2 Челябинского цинкового завода, имеют следующие значения: $T_1 = 56,1$ минут, $T_2 = 10,9$ минут, тогда суммарная постоянная времени составляет 67 минут.

Величина коэффициента усиления объекта может быть рассчитана как

$$K_y = \frac{Q_n^p}{u \cdot F_c \cdot c_z + k_n \cdot F_n}, \text{ (К} \cdot \text{с)/кг.}$$

В физическом смысле коэффициент усиления представляет собой изменение температуры слоя при изменении расхода шихты на 1 кг/с. Например, при изменении расхода шихты с 4,77 кг/с до 4,67 кг/с изменение температуры кипящего слоя составит около 20 °С (с 940 °С до 920 °С).

4.2. Анализ чувствительности характеристик модели

Определение чувствительности основных характеристик модели переходного процесса обжига цинкового концентрата в печи кипящего слоя на изменение входных режимных параметров системы выполнено с помощью математической модели (выражения (4.10) и (4.11)). Основными режимными параметрами являются расходы шихты (B , кг/с) и воздуха (G , м³/с), эффективная константа скорости химического реагирования (K , с⁻¹), концентрация кислорода в дутье (C_{O_2}); выходными характеристиками системы – температура слоя (T , К), безразмерная массовая концентрация горючих в слое (z), постоянные времени (T_1 и T_2). Для получения относительных коэффициентов чувствительности s отношение изменения выходных характеристик процесса к изменению входных

параметров системы приведено к безразмерному виду путем деления на коэффициенты равные конечным значениям входных и выходных параметров, соответственно. Безразмерный коэффициент, например, для температуры слоя в зависимости от расхода шихты рассчитывается как: $s_T = \frac{\Delta T \cdot B_{\text{конеч}}}{\Delta B \cdot T_{\text{конеч}}}$.

Начальное стационарное состояние принимается для режимных параметров работы печи кипящего слоя №2 ПАО «ЧЦЗ»: $B = 4,8$ кг/с, $G = 17000$ м³/с, $K = 175$ с⁻¹, $C_{O_2} = 33$ %. Подставляя данные параметры в выражения (4.10), (4.11), (4.16) и (4.18) получим выходные характеристики системы равные $T = 1217$ К (938 °С), $z = 3$ %, $T_1 = 56,1$ с, $T_2 = 10,9$ с, суммарная постоянная времени составляет 67 минут.

Значения чувствительности приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Анализ чувствительности

Параметр	T , К	sT	z	sz	T_1 , с	sT_1	T_2 , с	sT_2
$B=4,5-5,1$ кг/с	1158-1275	0,78	2,83-3,21	0,99	–	–	–	–
$G=15000-20000$ м ³ /с	1259-1159	-0,35	3,36-2,62	-1,14	58,7-52,7	-0,45	12,2-9,50	-1,13
$C_{O_2}=21-45$ %	–	–	4,74-2,12	-2,14	–	–	17,2-8,0	-2,14
$K=25-75$ с ⁻¹	–	–	5,18-3,25	-0,89	–	–	18,8-11,8	-0,89
$K=75-150$ с ⁻¹	–	–	3,25-3,03	-0,16	–	–	11,8-11,0	-0,15
$K=150-1250$ с ⁻¹	–	–	–	–	–	–	–	–

Из анализа чувствительности температуры слоя видно, что положительное влияние оказывает только увеличение расхода шихты, отрицательное – увеличение расхода воздуха. На чувствительность концентрации горючих в слое положительное влияние также оказывает только расход цинкового концентрата, наибольшее отрицательное – концентрация кислорода в дутье, затем расход воздуха и, наконец, эффективная константа скорости химического реагирования.

Анализ чувствительности постоянных времени процесса показал, что на первую постоянную времени отрицательное влияние оказывает только расход воздуха, на вторую наибольшее отрицательное влияние оказывает концентрация

кислорода в дутье, затем расход дутьевого воздуха, наименьшее – скорость химического реагирования.

Изменение расхода шихты приводит к линейному изменению выходных характеристик переходного процесса, в то время как изменение остальных параметров – к нелинейному изменению. С увеличением расхода воздуха с 15000 до 20000 м³/с происходит равномерное снижение чувствительности выходных параметров: sZ и sT_1 – на 10 %, sT и sT_2 – на 20 %. С увеличением концентрации кислорода в дутье с 21 до 45 % происходит неравномерное снижение чувствительности выходных параметров примерно на 40 % – чем выше концентрация, тем ниже чувствительность. Повышение скорости реакции выше 150 с⁻¹ практически не оказывает влияния на выходные характеристики процесса, уменьшение скорости реакции до нуля оказывает отрицательное влияние по экспоненте. В таблице 4.1 указано среднее значение чувствительности в исследуемом диапазоне.

4.3. Экспериментальное определение динамических характеристик обжиговой печи

На Челябинском цинковом заводе для сбора и обработки данных по состоянию технологического процесса обжига цинкового концентрата используется микропроцессорный контроллер с модулями ввода-вывода. Полученные данные выводятся на автоматизированное рабочее место оператора для контроля и дистанционного управления процессом. На рисунке 4.2 представлен фрагмент видеокadra, касающийся процесса обжига цинкового концентрата, без отображения сопутствующих процессов (отвод тепла от слоя, газовый тракт, системы подачи воздуха, устройства подачи шихты и т.п.).

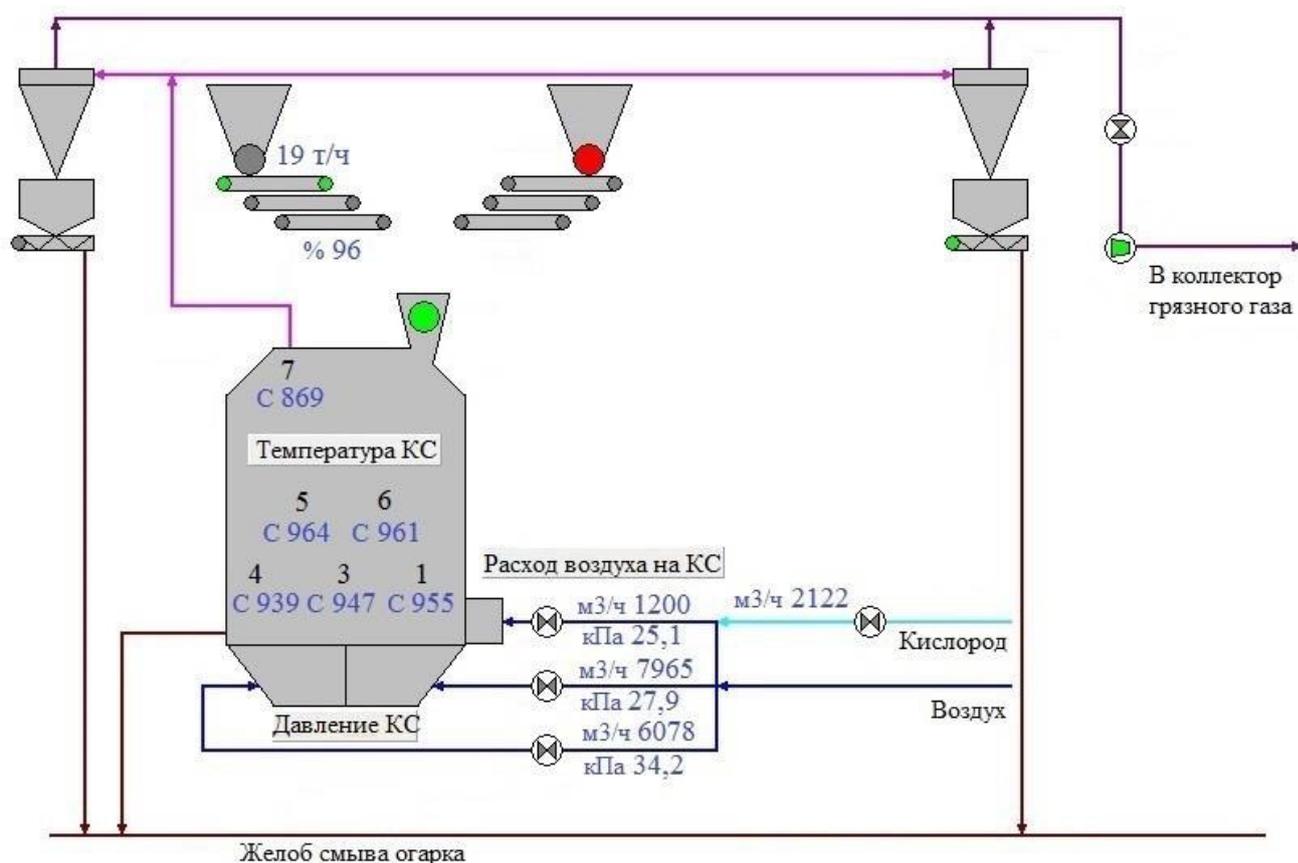


Рис. 4.2 – Видеокادر контроля и управления процессом обжига цинкового концентрата

На видеокadre представлены данные по температурам в слое и надслоевом пространстве печи, давлению, создаваемому воздуходувками, расходу дутья (воздуха и кислорода), расходу шихты и его косвенному показателю – частоте вращения электродвигателя ленточного транспортера, который можно дистанционно изменять (больше/меньше с шагом 2%) для корректировки расхода.

Схема расположения термопар по поду печи кипящего слоя №2 представлена на рисунке 4.3. Цифрами обозначены термопары, установленные на высоте 30 см от пода и выступающие в печь на 10 см от боковой стенки. Термопара №2 на рисунке не приведена, поскольку установлена в газоходе печи. Буквами обозначены различные сектора. В секторах А (форкамера) и В происходит интенсивное окисления концентрата, в секторах С – отвод тепла от слоя с помощью теплообменников (испарительных кессонов), в секторе D происходит выгрузка огарка через сливной порог. Обогащенный кислородом до 28 – 42 % воздух подается в форкамеру и следующую половину печи (сектор В и

половину сектора С в области расположения термопар 3 и 4). В оставшиеся сектора подается воздух.

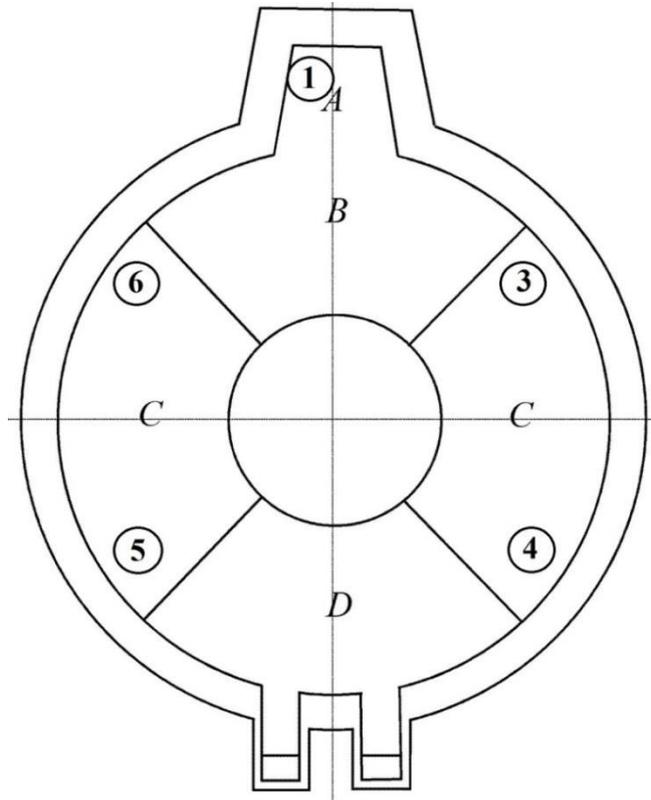


Рис. 4.3 – Схема установки термопар в печи

Кипящий слой с хорошей аэродинамикой обладает высокой теплопроводностью, и разница температур в слое между точками 1 и 5 не превышает $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ (3,5 %), поэтому слой можно считать изотермичным (Рис. 4.4).

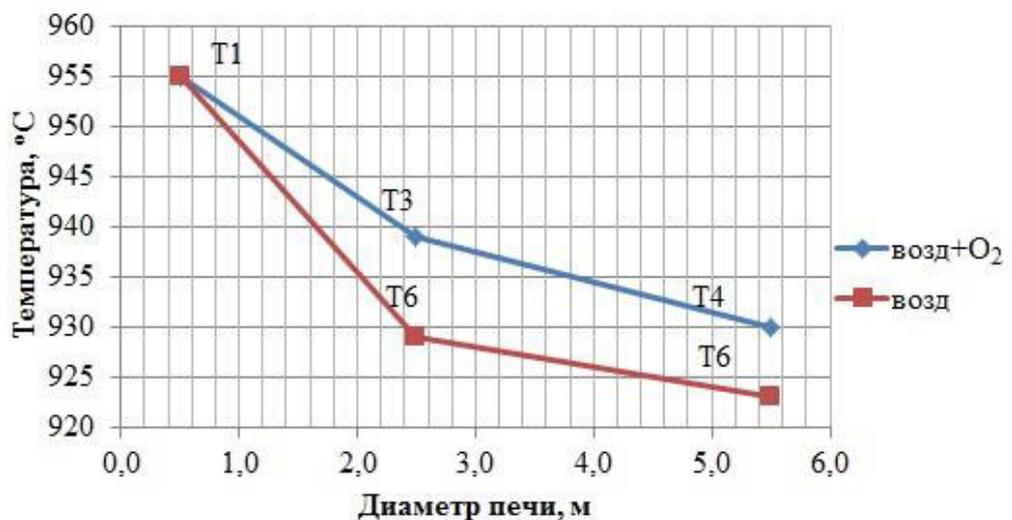


Рис. 4.4 – Показания термопар, расположенных по поду печи

Для определения динамических характеристик объекта (печи) необходимо определить постоянную времени процесса изменения температуры при изменении расхода шихты.

Изменение расхода шихты происходит следующим образом: при номинале (частоте 50 Гц (100%)) частота вращения двигателя составляет 1480 об/мин, что соответствует примерно расходу шихты 5,1 кг/с шихты (при постоянной настроенной высоте слоя на ленте, подобранной для рабочих параметров), нажатием на виртуальную кнопку, например, «меньше» происходит уменьшение частоты тока частотного преобразователя асинхронного двигателя на 1 Гц (2%) в течение 2 минут, при этом частота вращения двигателя изменится до 1450 об/мин, что соответствует примерно 5,05 т/ч. В среднем, в рабочем температурном диапазоне изменение частоты вращения ленточного транспортера на 1 Гц (2%) соответствует изменению расхода шихты на 0,05 кг/с.

Для получения зависимости температуры слоя от частоты тока, подаваемого на частотный преобразователь асинхронного двигателя ленточного транспортера, были проведены опыты на трех печах КС. Эксперимент заключался в установке (насколько это возможно в реальных условиях) стационарного состояния по температуре слоя, затем подавалось импульсное возмущение на частоту вращения до достижения видимого нового стационарного состояния. Все изменения по температуре и частоте фиксировались каждые 2,5 минуты. Для анализа использовались данные, полученные за две рабочих смены, от всех термопар (№1,3,4,5,6) по поду печей №2,3,5.

На рисунке 4.5 приведен фрагмент зависимостей температур в разных точках печи №2 от ступенчатого изменения частоты вращения на 4%.

Анализируя графические данные, видно, что температура во всех точках начинает одновременно изменяться в среднем через 20 минут (транспортное запаздывание) после внесения возмущения (уменьшения частоты вращения ленточного транспортера) и продолжает снижаться до момента, пока не внесли противоположное возмущение. Ввиду того, что это промышленная печь (не лабораторная), выход на стационар невозможен из-за постоянного изменения в

узком диапазоне влажности шихты, химического состава, удельного веса на ленточном транспортере.

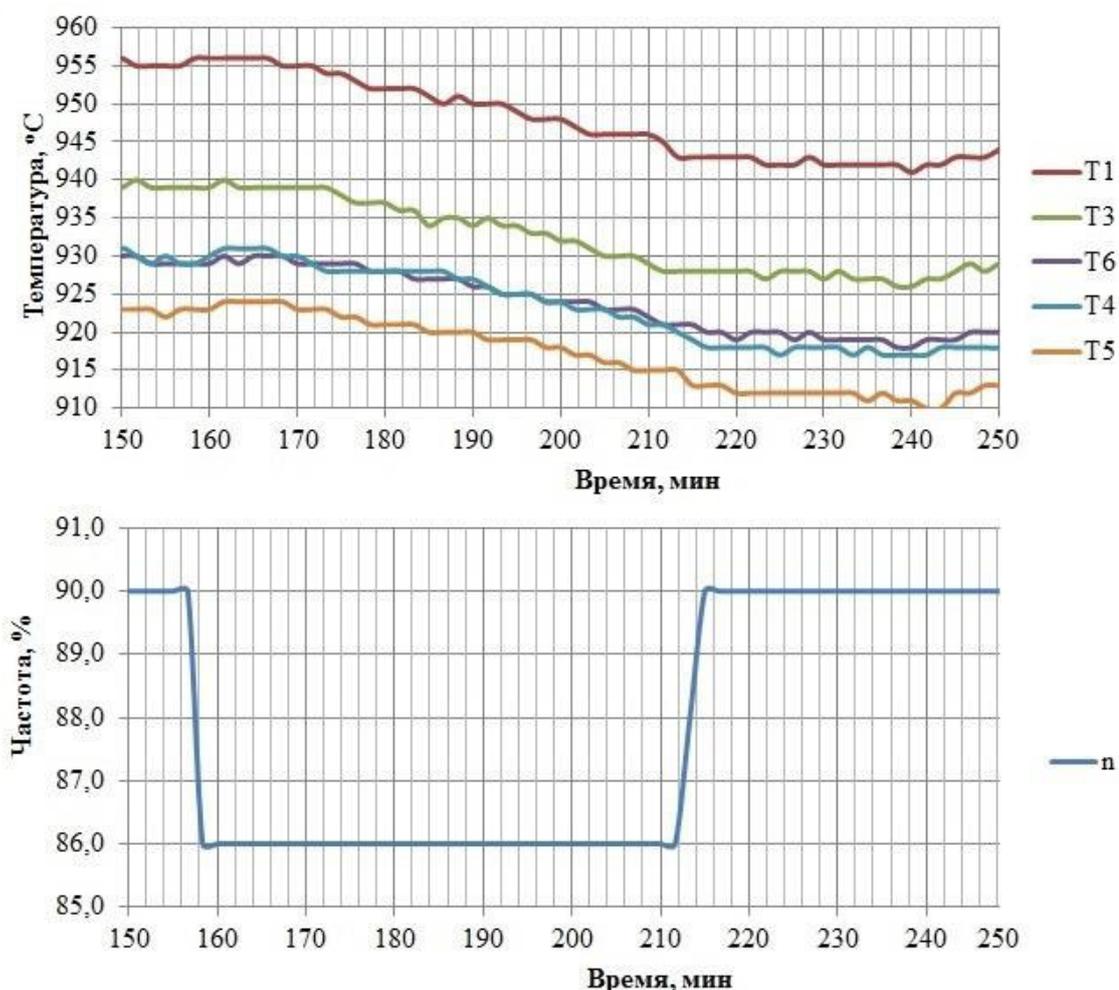


Рис. 4.5 – Графики изменения температур в разных точках печи КС при импульсном изменении частоты вращения двигателя транспортера

Транспортное запаздывание обусловлено несколькими причинами: инерционностью термопары типа ТХАв-2388 ввиду наличия керамического колпачка и тубой-чехлом из нержавеющей стали 12Х18Н10Т [119,120], а также постепенным (не мгновенным) изменением частоты вращения двигателя транспортера с шагом 2% за 2 минуты (изменение на 4% произошло за 4 минуты).

Для получения значения постоянной времени из эксперимента при импульсном возмущении необходимо преобразовать рисунок 4.5, построив изменение, например, температуры в точке 3 до ступенчатого возмущения (Рис. 4.6).

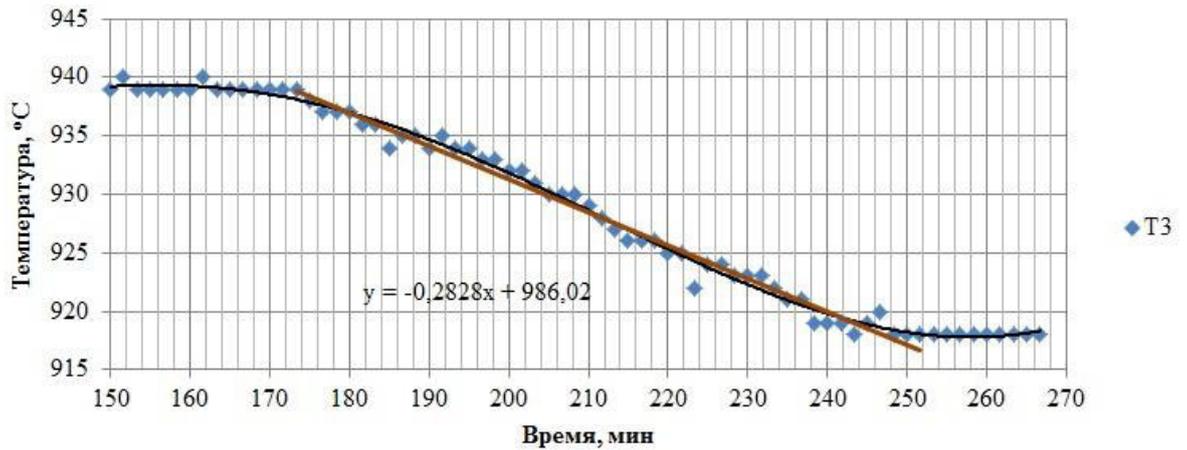


Рис. 4.6 – График изменения температуры ТЗ, достроенный до ступенчатого возмущения частоты вращения двигателя транспортера

По уравнению аппроксимации $y = -0,28 \cdot x + 986$ (Рис. 4.6) можно определить постоянную времени процесса:

$$T_o = x_1 - x_2 = \frac{(986 - y_2)}{0,28} - \frac{(986 - y_1)}{0,28} = \frac{(986 - 938)}{0,28} - \frac{(986 - 918)}{0,28} = 71 \text{ минута.}$$

После обработки ряда экспериментов (для разных смен и печей) усредненное значение составило 68,7 минут.

По результатам эксперимента (Рис. 4.6), коэффициент усиления объекта составляет: $K_y = \frac{\Delta T}{\Delta n} = \frac{940 - 920}{90 - 86} = \frac{20}{4} = 5 \text{ К/\%}$, или $K_y = 200 \text{ (К} \cdot \text{с)/кг}$.

4.4. Сравнение экспериментальных и расчетных данных

Для верификации разработанной математической модели по (4.10), (4.11) результаты расчета изменения температуры кипящего слоя при ступенчатом возмущении (изменении расхода шихты) были сопоставлены с показаниями термопары ТЗ, представленными на рисунке 4.5. Данный фрагмент представлен на рисунке 4.7.

Из рисунка видно, что расчетные данные хорошо согласуются с экспериментальными.

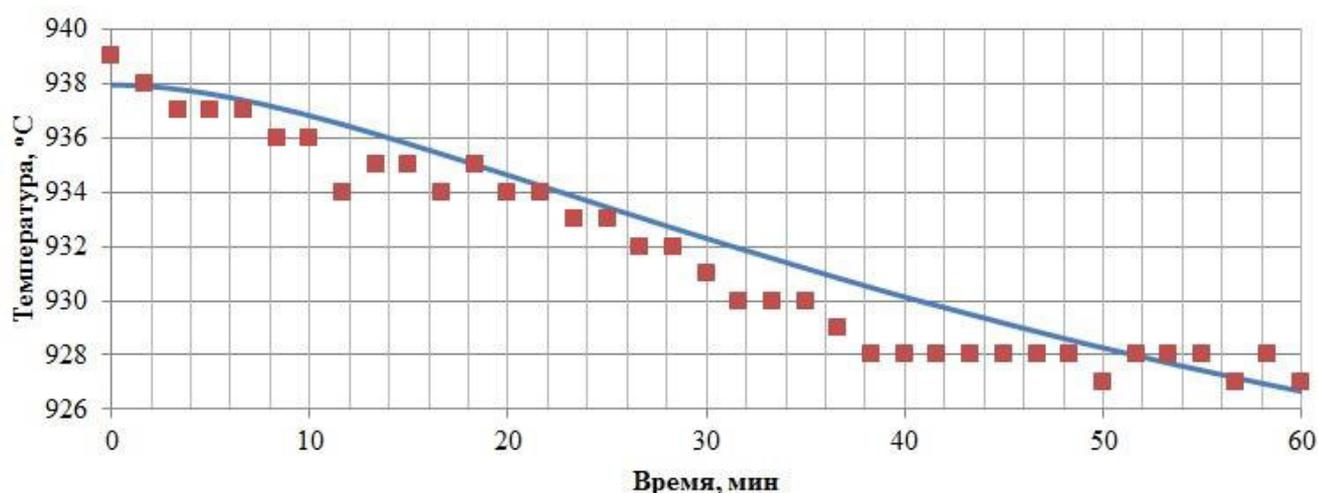


Рис. 4.7 – Сопоставление расчета по (4.10) с экспериментальными данными по термопаре ТЗ (Рис. 4.5): линия – расчет, точки – эксперимент

Также были сопоставлены постоянные времени и коэффициент усиления объекта, полученные из экспериментов, с расчетными значениями. Полученные данные практически совпадают и составляют: $T_o = 67$ минут – расчетное значение, $T_o = 68,7$ минут – экспериментальное, $K_y = 5$ К/% – расчет и эксперимент. Далее для расчета настроек регулятора принимается постоянная времени объекта равная 70 минут.

4.5. Разработка регулятора и выбор его настроек

Для разработки алгоритма и определения настроек регулятора температуры кипящего слоя необходимо воспроизвести процесс обжига, протекающий в производственной печи, в графической среде имитационного моделирования Matlab Simulink, используя расчетные и экспериментальные данные по динамическим характеристикам объекта.

Ввиду большой инерционности объекта и длительности переходного процесса модель печи кипящего слоя может быть описана передаточной функцией с инерционным звеном первого порядка, последовательно соединенным с запаздывающим звеном:

$$W(p) = \frac{K_y \cdot e^{-p\tau}}{1 + pT_o} = e^{-p \cdot 1200} \cdot \frac{5}{1 + 4200 \cdot p},$$

где $K_y = 5 \text{ К/\%}$ – коэффициент усиления объекта; $\tau = 1200 \text{ с}$ – время запаздывания, с; $T_o = 70 \text{ мин} = 4200 \text{ с}$ – постоянная времени объекта, с; p – оператор Лапласа.

В основе разработанного регулирующего контура (Рис. 4.8) лежит стандартный пропорционально-интегральный регулятор (ПИ-регулятор) [82], передаточная функция которого имеет вид:

$$W(p) = K_p + \frac{1}{T_u \cdot p},$$

где K_p – коэффициент усиления регулятора, T_u – постоянная времени интегрирования, с.

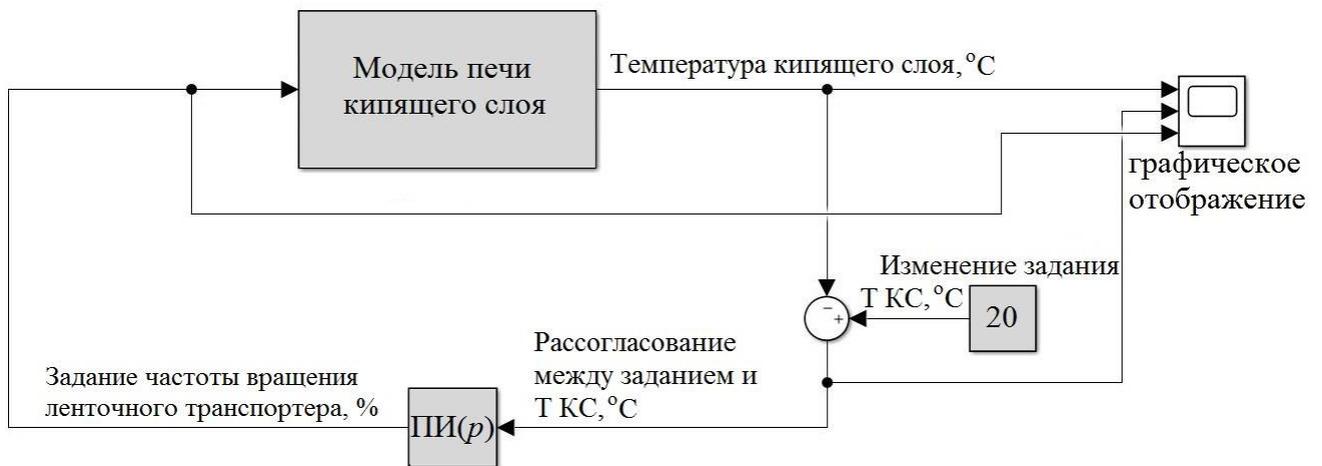


Рис. 4.8 – Структура регулятора температуры кипящего слоя в Matlab Simulink

В первый момент времени системе в стационарном состоянии выдается задание на изменение температуры на $+20 \text{ °C}$, при этом регулятор сначала ступенчато изменяет задание по частоте вращения ленточного транспортера (пропорциональная составляющая), а затем продолжает повышать частоту до момента, когда температура начинает изменяться (работа интегральной составляющей), после этого регулятор начинает снимать возмущение до выхода температуры на заданное значение. Качество переходного процесса, которое включает в себя устойчивость, точность и быстродействие, определяется выбором значений пропорционального (K_p) и интегрального (T_u) коэффициентов.

Пропорциональный коэффициент отвечает за быстродействие регулятора, но снижает устойчивость системы: чем больше значение, тем большее

воздействие будет формироваться на выходе регулятора. Интегральная часть отвечает за скорость выхода на заданную величину: чем больше значение, тем более устойчивая система и более медленный выход на стационарное значение [121].

Расчет в первом приближении численных значений параметров настройки регулятора температуры кипящего слоя производился по показателям, характеризующим динамические свойства объекта [82].

$$\text{При } 0,2 \leq \frac{\tau}{T_o} = \frac{20}{70} = 0,286 \leq 1,5$$

$$K_p = \frac{0,38}{K_y} \cdot \frac{\tau/T_o + 0,6}{\tau/T_o - 0,08} = \frac{0,38}{5} \cdot \frac{20/70 + 0,6}{20/70 - 0,08} = 0,327 \text{ \%}/\text{К}.$$

$$T_u = 0,8 \cdot T_o = 56 \text{ минут} = 3360 \text{ секунд}.$$

На рисунке 4.9 приведен переходный процесс с рассчитанными настройками.

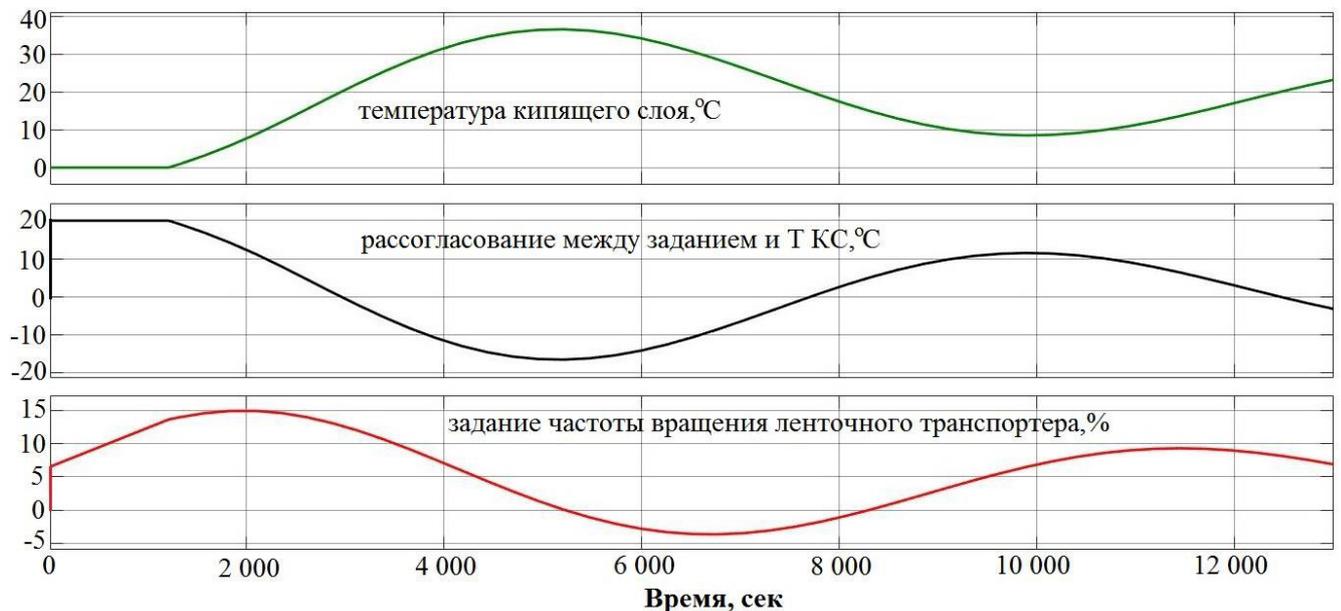


Рис. 4.9 – Переходный процесс с рассчитанными настройками

$$(K_p = 0,327 \text{ \%}/\text{К}, T_u = 3360 \text{ с})$$

Как видно из рисунка 4.9 постоянная времени интегрирования слишком мала, поскольку система находится на границе устойчивости.

При еще большем уменьшении постоянной времени интегрирования процесс становится неустойчивым (Рис. 4.10).

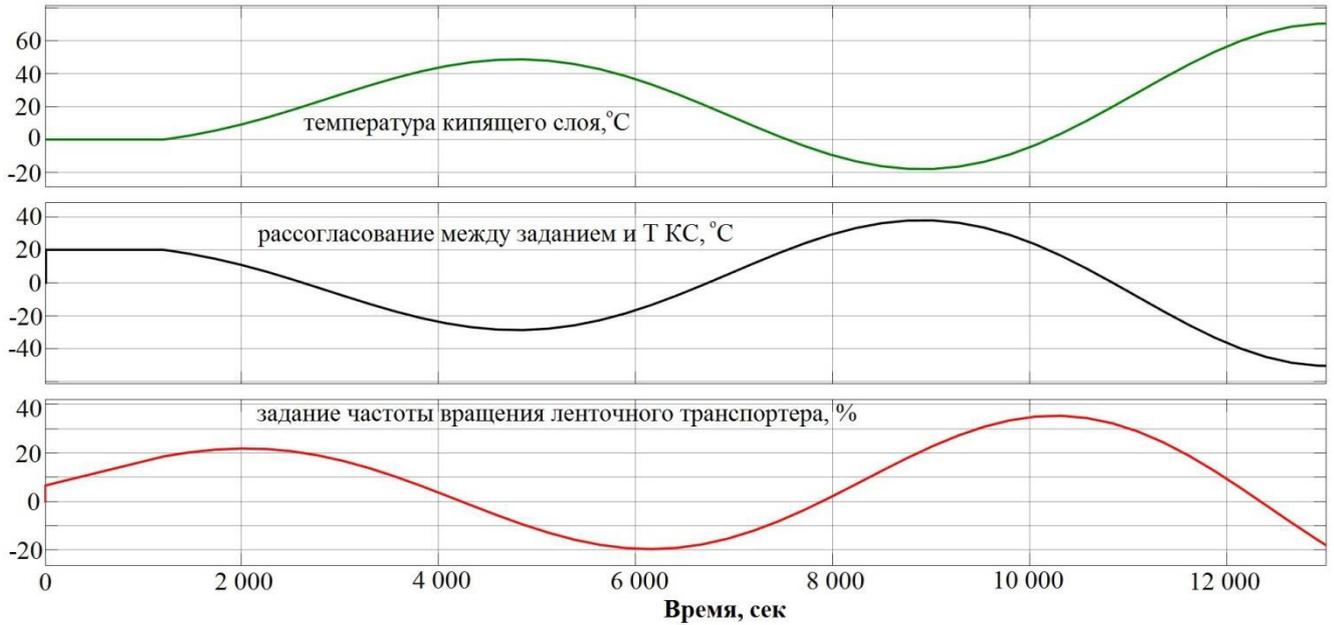


Рис. 4.10 – Неустойчивый переходный процесс ($K_p = 0,327 \text{ \%}/\text{K}$, $T_u = 2000 \text{ с}$)

При увеличении постоянной времени интегрирования (T_u) почти в 5 раз можно наблюдать следующую картину (Рис. 4.11).

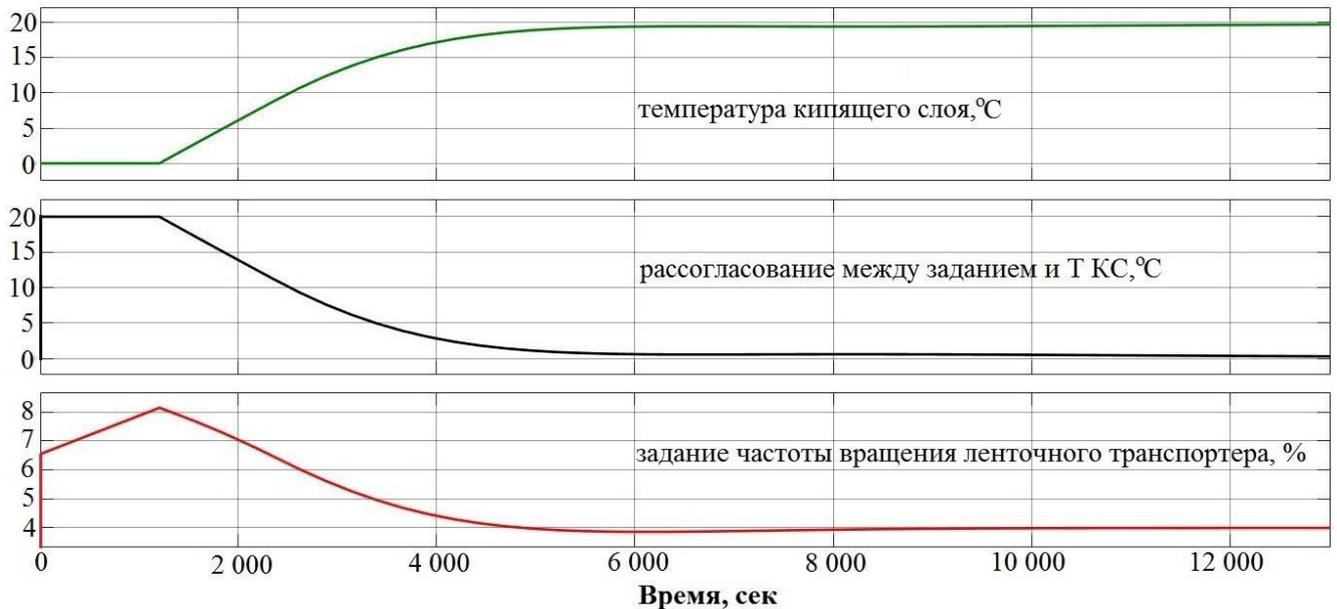


Рис. 4.11 – Аperiodический переходный процесс ($K_p = 0,327 \text{ \%}/\text{K}$, $T_u = 15000 \text{ с}$)

Данный процесс является аperiodическим, позволяет выйти на заданное значение за 70 минут.

Для ускорения вывода регулируемого параметра на заданную величину необходимо увеличить коэффициент усиления, например, в 2 раза. Тогда получим следующий переходный процесс (Рис. 4.12).

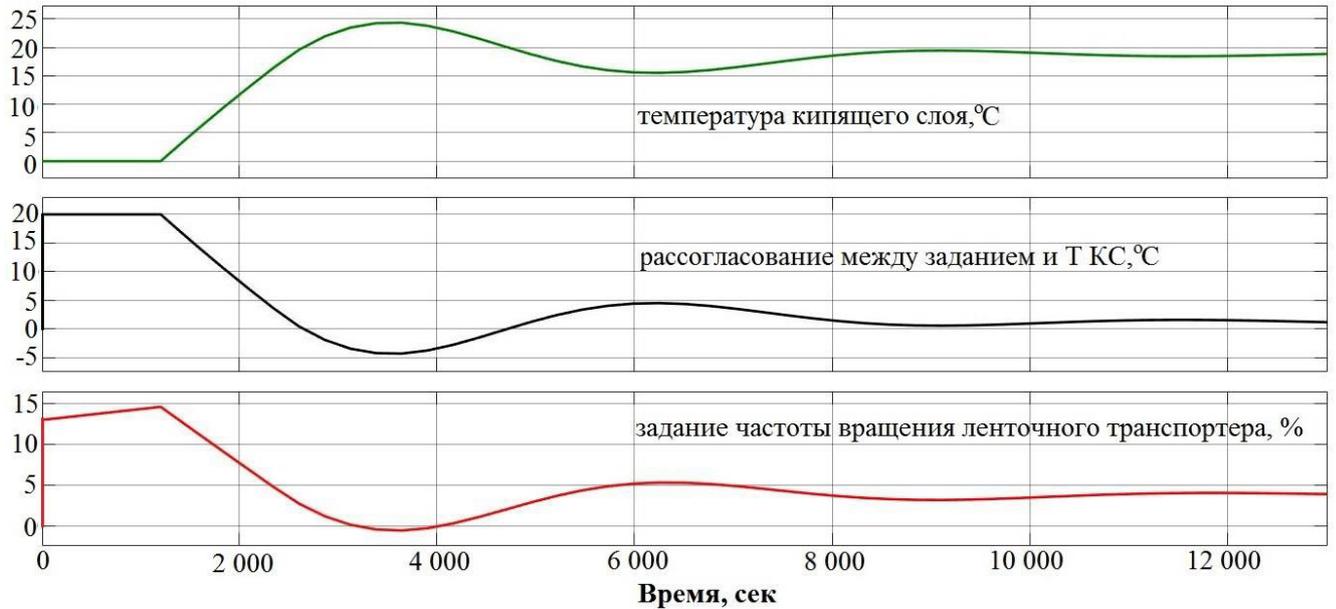


Рис. 4.12 – Переходный процесс с перерегулированием ($K_p = 0,65 \text{ \%}/\text{К}$, $T_u = 15000 \text{ с}$)

Полученный переходный процесс характеризуется перерегулированием.

Для получения кривой с минимальным временем выхода на заданное значение и минимальным перерегулированием были подобраны следующие настройки: $K_p = 0,5 \text{ \%}/\text{К}$, $T_u = 12000 \text{ с}$ (Рис. 4.13).

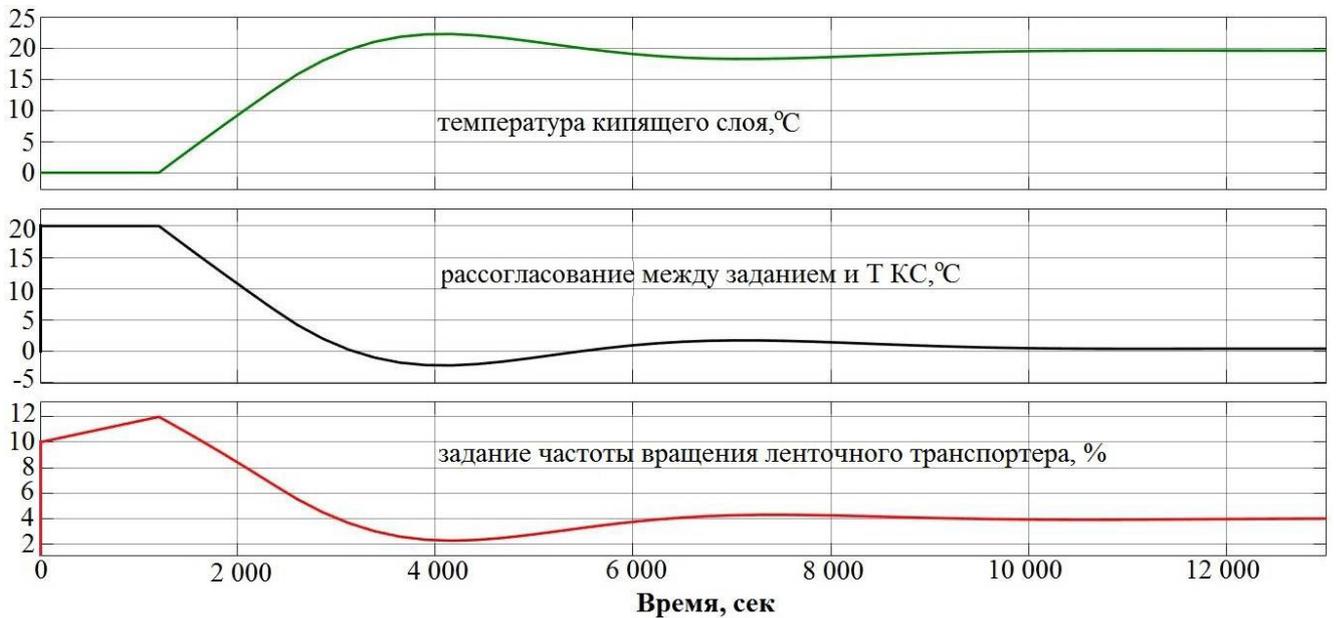


Рис. 4.13 – Переходный процесс с небольшим перерегулированием
($K_p = 0,5 \text{ \%}/\text{К}$, $T_u = 12000 \text{ с}$)

При подобранных настройках регулятор выводит систему на заданное значение в течение 50 минут (с учетом времени запаздывания).

Также моделирование было проведено в программно-техническом комплексе «Овация», который эксплуатируется на энергетических объектах. Результаты соответствуют полученным в Matlab Simulink. На рисунке 4.14 приведен переходный процесс, полученный в модели печи кипящего слоя средствами ПТК «Овация», при изменении задания регулируемому параметру с 940 °С на 920 °С.

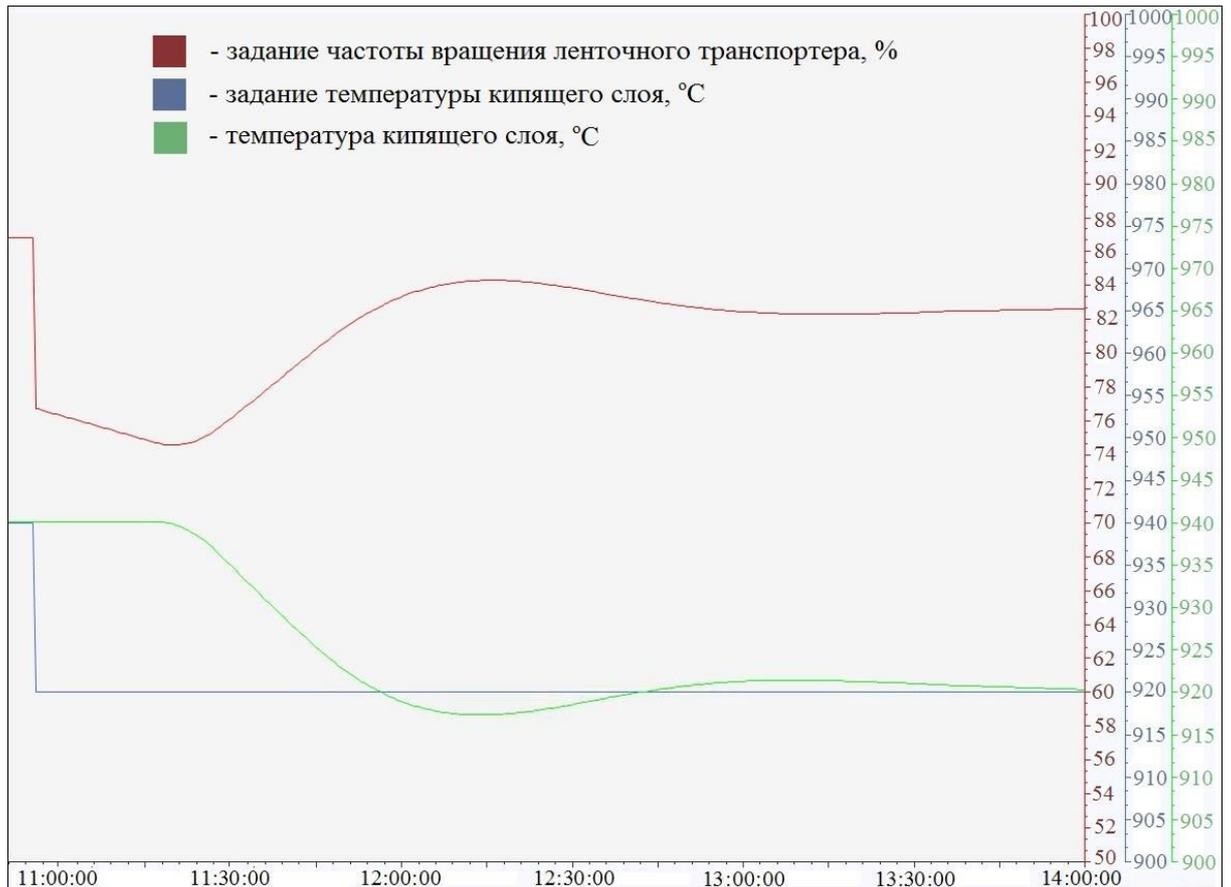


Рис. 4.14 – Переходный процесс в ПТК «Овация»

Настройки регулятора температуры кипящего слоя, полученные эмпирическим путем, определены только для диапазона 860 – 960 °С (диапазон проведения экспериментов). Для работы в более широком температурном диапазоне требуется проведение дополнительных экспериментов по снятию характеристики объекта (зависимость температуры слоя от частоты вращения ленточного транспортера), и затем скорректировать структурную схему регулятора, выполнив автоподстройку параметра (на различных интервалах температур применяются разные настройки регулятора).

4.6. Выводы по главе 4

1. Разработана математическая модель переходных процессов в печи кипящего слоя для обжига цинковых концентратов, позволяющая рассчитать изменение температуры слоя и концентрации горючих веществ в нем при изменении расхода загружаемой в печь шихты.
2. Определена чувствительность основных характеристик модели переходного процесса обжига цинкового концентрата в печи кипящего слоя на изменение входных режимных параметров системы.
3. Разработана модель печи кипящего слоя и алгоритм регулятора температуры в графической среде имитационного моделирования Matlab Simulink и программно-техническом комплексе (ПТК) «Овация», подобраны настройки регулятора температуры кипящего слоя с помощью численного моделирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы диссертационной работы состоят в следующем:

1. Экспериментально определены кинетические характеристики окисления шихты, сфалерита и пирита.
2. На основании изученной кинетики окисления цинкового концентрата предложена математическая модель газообразования в кипящем слое, которая достаточно хорошо описывает зависимость удельной массовой концентрации в слое от расхода шихты и концентрации кислорода в дутье, что позволяет рекомендовать ее для использования в инженерной практике.
3. На основании полученных кинетических характеристик процесса обжига шихты разработана математическая модель переходных процессов в печи кипящего слоя для обжига цинковых концентратов. Созданная математическая модель хорошо коррелирует с экспериментальными данными, что позволяет рекомендовать ее для внедрения в инженерную практику. Также определена чувствительность основных характеристик модели на изменение входных режимных параметров системы.
4. Разработанный на основании полученной математической модели алгоритм регулятора температуры кипящего слоя с подобранными настройками рекомендован для внедрения на ПАО «ЧЦЗ». Внедрение регулятора температуры позволит без участия оператора поддерживать заданную температуру кипящего слоя, исключить недожог шихты, и снизить опасность шлакования слоя.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования заключаются в оптимизации процесса обжига цинкового концентрата путем изучения влияния изменения расхода дутьевого воздуха и концентрации кислорода в дутье на качество огарка и содержание сульфидной серы в продуктах обжига (с учетом полученных кинетических характеристик).

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- A^p – зольность шихты в рабочем состоянии, %;
- Ar_6 – критерий Архимеда при диаметре витания;
- Ar_o – критерий Архимеда при диаметре начала ожигения;
- B – расход шихты, кг/с;
- c, c_o, \bar{c} – текущая, начальная и средняя относительная концентрация кислорода в слое шихты;
- $c_s, c_{ш}$ – теплоемкость слоя (огарка) и шихты, кДж/(кг·К);
- c_g – теплоемкость газов, кДж/(м³·К);
- C_o, C_K – концентрация кислорода на входе в слой и выходе из слоя, кг/м³;
- C_{O_2} – концентрация кислорода в слое, кг/м³;
- \bar{C}_{O_2} – средняя концентрация кислорода в слое, кг/м³;
- D – коэффициент молекулярной диффузии кислорода в азоте, м²/с;
- D_x – проход через соответствующее сито, %;
- E_a – энергия активации, кДж/кмоль;
- F – внешняя поверхность частиц в объеме слоя, м²;
- F_x – фракционный остаток на соответствующем сите, %;
- F_n – площадь поверхностей теплообмена, м²;
- F_c – площадь сечения топки, м²;
- g – ускорение свободного падения, м/с²;
- $G_{вл}$ – расход влажных продуктов сгорания, м³/с;
- h – толщина слоя навески шихты, м;
- H – высота слоя, м;
- j – удельный поток шихты, реагирующей в единицу времени, кг/(м³·с);
- j^* – удельный поток реагирующей шихты, отнесенный к концентрации горючих веществ, равной 1, кг/(м³·с);
- J – массовое количество вещества, реагирующего в единицу времени, кг/с;
- k – константа скорости химического реагирования, отнесенная к внешней поверхности частицы, м/с;

k_0 – предэкспоненциальный множитель, с^{-1} ;

k_n – коэффициент теплопередачи от слоя к поверхностям теплообмена, $\text{кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

K – эффективная константа скорости химического реагирования, с^{-1} ;

K_p – коэффициент усиления регулятора;

K_y – коэффициент усиления объекта;

m – масса вещества, кг ;

m_0 – начальная масса реагирующего вещества, кг ;

M – масса кипящего слоя, кг ;

n – коэффициент полидисперсности;

n – количество горючих частиц в слое;

p – оператор Лапласа;

Q_n^p – низшая теплота сгорания шихты в рабочем состоянии, $\text{кДж}/\text{кг}$;

R – универсальная газовая постоянная, $\text{кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$;

R_x – полный остаток на соответствующем сите, %;

Re_δ – число Рейнольдса при диаметре витания;

Re_o – число Рейнольдса при диаметре начала ожигения;

s – относительный коэффициент чувствительности;

S – внешняя удельная поверхность частиц шихты в слое огарка, $\text{м}^2/\text{м}^3$;

S_i – удельная внутренняя поверхность реагирования частиц, $\text{м}^2/\text{м}^3$;

t – температура, $^\circ\text{С}$;

T – температура, К ;

t_c – температура слоя, $^\circ\text{С}$;

t_w, t_δ, t_n – начальная температура шихты, воздуха и поверхностей нагрева, $^\circ\text{С}$;

T_u – постоянная времени интегрирования, с ;

T_o – постоянная времени объекта, с ;

u – скорость газа в топке при нормальных условиях, $\text{м}/\text{с}$;

V – объём слоя, м^3 ;

V^0 – теоретически необходимое количество воздуха, $\text{м}^3/\text{кг}$;

w – скорость газов в топке, $\text{м}/\text{с}$;

W^p – влажность шихты, %;

x – размер частиц (отверстий или ячеек сита), мкм;

x – координата по толщине слоя h навески шихты, м;

X – степень конверсии;

z – удельная массовая концентрация горючих в объеме слоя;

α – коэффициент избытка воздуха;

δ – диаметр частиц, м;

δ_0 – характерный диаметр частиц, мкм;

δ_{50} – среднемассовый диаметр частиц, мкм;

δ_g – диаметр витания частиц, мкм;

δ_o – диаметр начала ожигания частиц, мкм;

ε – порозность слоя;

ζ_0 – глубина проникновения реакции, м;

μ – молярная масса вещества, г/моль;

ν – коэффициент, учитывающий соотношение молярных масс исходного вещества и кислорода в соответствии со стехиометрическими коэффициентами;

ν_g – кинематическая вязкость воздуха, м²/с;

ζ – коэффициент, учитывающий количество исходного вещества, вступившего в реакцию, отнесенное к видимому изменению массы;

ρ – плотность вещества с учетом внутренней порозности частицы, кг/м³;

ρ_g – плотность воздуха, кг/м³;

ρ_c – истинная плотность огарка, кг/м³;

$\rho_{ш}$ – истинная плотность шихты, кг/м³;

τ – время, с;

χ – теплота парообразования, кДж/кг.

АСУТП – автоматизированная система управления технологическими процессами;

КС – кипящий слой;

ТГА – термогравиметрический анализ;

ДТА – дифференциальный термический анализ;

ДТГ-анализ – дифференциальный термогравиметрический анализ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zivkovic, Z.D. Kinetics and mechanism of the natural mineral marmatite oxidation process / Z.D. Zivkovic, D. Zivkovic, D. Grujicic, N. Strbac, V. Savovic // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. — 1998. — Issue 1. — Vol. 54. — P. 35–40.
2. Dimitrov, R.I. Mechanism of zinc sulphide oxidation / R.I. Dimitrov, I.K. Bonev // *Thermochimica Acta*. — 1986. — Vol. 106. — P. 9–25.
3. Dimitrov, R.I. Oxidation of marmatite / R.I. Dimitrov, N. Moldovanska, I.K. Bonev, Z. Zivkovic // *Thermochimica Acta*. — 2000. — Vol. 362. — P. 145–151.
4. Kim, B.-S., Jeong, S.-B., Kim, Y., Kim H.-S. Oxidative roasting of low grade zinc sulfide concentrate from Gagok mine in Korea / B.-S. Kim, S.-B. Jeong, Y. Kim, H.-S. Kim // *Materials Transactions*. — 2010. — Vol. 51. — No.8. — P. 1481–1485.
5. Гуляева, Р.И. Механизм и кинетика термического окисления природного сфалерита / Р.И. Гуляева, Е.Н. Селиванов, С.М. Пикалов // *Металлы*. — 2018. — №2. — С. 3–10.
6. Boyanov, B. Thermal behavior of zinc sulfide concentrates with different iron content at oxidative roasting / B. Boyanov, A. Peltekov, V. Petkova // *Thermochimica Acta*. — 2014. — Vol. 586. — P. 9–16.
7. Терентьев, В.М. Исследование и разработка технологии обжига в печах кипящего слоя тонкодисперсных сульфидных цинковых концентратов: автореферат дис. канд. техн. наук: 05.16.02. — Екатеринбург, 2017. — 26 с.
8. Jarosz, P. Kinetics of the fluidised oxidation of zinc sulphide concentrates with an addition of inert materials / P. Jarosz, S. Maleski // *Archives of metallurgy and materials*. — 2014. — Vol. 59. — Issue 4. — P. 1367–1372.
9. Queiroz, C.A.R. Oxidation of zinc sulphide concentrate in a fluidised bed reactor - Part 2: The influence of experimental variables on the kinetics / C.A.R. Queiroz, R.J. Carvalho, F.J. Moura // *Brazilian journal of chemical engineering*. — 2005. — Vol. 22. — No. 1 — P. 127–133.

10. Natesan, K. Oxidation kinetic studies of zinc sulfide in a fluidized bed reactor / K. Natesan, W.O. Philbrook // Metallurgical and Materials Transactions. — 1970. — Vol. 1. — P. 1353–1360.
11. Fukunaka, Y. Oxidation of zinc sulfide in a fluidized bed / Y. Fukunaka, T. Monta, Z. Asaki, Y. Kondo // Metallurgical Transactions B. — 1976. — Vol. 7. — P. 307–314.
12. Boyanov, B. X-ray, DTA and TGA analysis of zinc sulfide concentrates and study of their charging for roasting in fluidized bed furnace / B. Boyanov, A. Peltekov // Bulgarian Chemical Communications. — 2003. — Vol. 44. — P. 215–221.
13. Серебренникова, Э.Я. Обжиг сульфидных материалов в кипящем слое / Э.Я. Серебрякова. — М.: Metallurgy, 1982. — 111 с.
14. Марченко, Н.В. Metallurgy тяжелых цветных металлов / Н.В. Марченко, Е.П. Вершинина, Э.М. Гильденбрандт. — Красноярск: ИПК СФУ, 2009. — 394 с.
15. Набойченко, С.С. Процессы и аппараты цветной металлургии: учебник / С.С. Набойченко, Н.Г. Агеев, С.В. Карелов, С.В. Мамяченков, В.А. Сергеев; под общей ред. С.С. Набойченко. — Екатеринбург: Изд-во Урал ун-та, 2013. — 564 с.
16. Использование сернистых газов на зарубежных заводах цинковой промышленности / Н.П. Добросельская; Центр. науч.-исслед. ин-т информ. и техн.-экон. исслед. цв. металлургии. — М.: Цветметинформация, 1975. — 51 с.
17. Романтеев, Ю.П. Metallurgy тяжелых цветных металлов. Свинец. Цинк. Кадмий / Ю.П. Романтеев, В.П. Быстров; Нац. исслед. технол. ин-т «МИСиС». — Москва: МИСиС, 2010. — 575 с.
18. Тарасов, А.В. Общая металлургия: Учебник для вузов / А.В. Тарасов, Н.И. Уткин. — М.: Metallurgy, 1997. — 592 с.
19. Тодес, О.М. Аппараты с кипящим зернистым слоем: (Гидравл. и тепловые основы работы) / О.М. Тодес, О.Б. Цитович. — Л.: Химия: Ленингр. отд-ние, 1981. — 296 с.: ил.
20. Кучин, Г.М. Обжиг цинковых концентратов в кипящем слое / Г.М. Кучин. — М.: Metallurgy, 1966. — 75 с.

21. Расчеты аппаратов кипящего слоя: Справочник / под. ред. И.П. Мухленова, Б.С. Сажина, В.Ф. Фролова. Химия: 1986. — 352 с.
22. Brouhton, J. Combustion of coal in fluidized beds / J. Brouhton, J.R. Howard // Fluidised Beds. Combustion and Application / Ed. J.R. Howard. London. — 1983. — P. 37–76.
23. Баскаков, А.П. Котлы и топки с кипящим слоем / А.П. Баскаков, В.В. Мацнев, И.В. Распопов. — М.: Энергоатомиздат, 1995. — 352 с.
24. Забродский, С.С. Высокотемпературные установки с псевдоожиженным слоем / С.С. Забродский. — М.: Энергия, 1971. — 325 с.
25. Применение технологии сжигания твердых топлив в кипящем слое на отечественных ТЭС / Г. А. Рябов и др. // Новое в российской электроэнергетике. — 2017. — №. 7. — С. 46–57.
26. Кунии, Д. Промышленное псевдоожижение / Д. Кунии, О. Левеншпиль; Перевод с англ. В. С. Шеплева и А. М. Гулюка ; Под ред. чл.-кор. АН СССР М. Г. Слинько и канд. хим. наук Г. С. Яблонского. — М.: Химия, 1976. — 446 с.: ил.
27. Махорин, К.Е. Сжигание топлива в псевдоожиженном слое / К.Е. Махорин, П.А. Хинкис. — Киев: Наукова думка, 1989. — 204 с.
28. Кубин, М. Сжигание твердого топлива в кипящем слое. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 144 с.
29. Мунц, В.А. Сжигание твердого топлива в кипящем слое. // В кн.: Псевдоожижение / под ред. В.Г. Айнштейна, А.П. Баскакова. — М.: Химия, 1991. — 398 с.
30. Stratos Tavoulareas, E. Fluidized-Bed Combustion Technology / E. Stratos Tavoulareas // Annual Review of Energy and the Environment. — 1991. — Vol.16. — P.25–57.
31. Баскаков, А.П. Процессы тепло- и массопереноса в кипящем слое / А.П. Баскаков, Б.В. Берг, А.Ф. Рыжков, Н.Ф. Филипповский; Под ред. А.П. Баскакова. — М.: Metallurgy, 1978. — 247 с.
32. Клушин, Д.Н. Кипящий слой в цветной металлургии. / Д.Н. Клушин, Э.Я. Серебрякова, А.Д. Бессер. — М.: Metallurgy, 1978. — 280 с.

33. Savinova, Y.A. Roasting of a sulfide polymetallic concentrate in a fluidized bed furnace / Y.A. Savinova, V.A. Popov, A.B. Portov, L.S. Tsemekhman // *Russian Metallurgy (Metally)*. — 2014. — Vol. 2014. — P. 351–357.
34. Hyppanen, T. Dynamic modeling for simulation and control of a circulating fluidizedbed combustor / T. Hyppanen, A. Kettunen, Y. Lee Yam, J. Riiali // *Fluidized Bed Combustion*. — 1993. — Vol. 2— P. 1121–1127.
35. Паньшин, А.М. Освоение процесса обжига тонкодисперсных цинковых концентратов уральских месторождений на ОАО ЧЦЗ / А.М. Паньшин [и др.] // *Цветные металлы*. — 2010. — №5. — С. 34–37.
36. Мироевский, Г.П. Совершенствование обжига цинковых концентратов в печи кипящего слоя / Г.П. Мироевский, Ф.А. Мызенков, Б.Л. Доброцветов. — М.: Изд. «Гинцветмет», 2001. — 13 с.
37. Баскаков, А.П. Выгорание полидисперсного топлива в кипящем слое / А.П. Баскаков, В.А. Мунц, А.А. Ашихмин, Ю.Н. Федоренко // *ИФЖ*. — 1987— Т. 53. — №1 — С. 70–77.
38. Лейзерович, Г.Я. Обжиг цинковых концентратов в кипящем слое / Г.Я. Лейзерович, И.В. Бабина, Э.Я. Серебренникова; Под общ.ред. Г.Я. Лейзеровича. — М.: *Металлургиздат*, 1959. — 222 с.
39. Dry, R.J., La Nauze, R.D. Combustion in fluidized beds / R.J. Dry, R.D. La Nauze // *Chemical Engineering Progress*. — 1990. July. — P. 31–47.
40. Карван, Т. Влияние химического состава цинковых концентратов на их обжиг / Т. Карван, Ч. Малиновски // *Металлургия*. — 1984. — №12. — С. 22–26.
41. Сергеев, Г.И. Влияние состава шихты на эффективность обжига цинковых концентратов в печах КС / Г.И. Сергеев [и др.]. // *КИМС*. — 1990. — №11. — С. 84–86.
42. Снурников, А.П. *Гидрометаллургия цинка: Учеб. пособие для ПТУ.*— М.: *Металлургия*, 1981. — 384 с.
43. Гудима, Н.В. Котлы и топки с кипящим слоем, Н.В. Краткий справочник по металлургии цветных металлов / Н.В. Гудима, Я.П. Шейн. — М.: *Металлургия*, 1975. — 536 с.

44. Белоглазов, И.И. Изучение распределения времени пребывания продуктов обжига в печи кипящего слоя / И.И. Белоглазов, Ю.В. Шариков, И.Н. Белоглазов // Изд. Зап. горного инс-та. — 2006. — №169. — С. 61–62.
45. Gao, W. Residence time distribution of particles in a bubbling fluidized bed with their continuous input and output / W. Gao, J.-W. Zhang, Y. Wang, B. Huang, G.-W. Xu // Guocheng Gongcheng Xuebao/The Chinese Journal of Process Engineering. — 2012. — Vol. 12. — P. 9–13.
46. Розовский, А.Я. Гетерогенные химические реакции. Кинетика и макрокинетика / А.Я. Розовский. — М.: Наука, 1980. — 324 с.
47. Чистяков, А.Н. Справочник по химии и технологии твердых горючих ископаемых / А.Н. Чистяков и др. — СПб.: Синтез, 1996. — 363 с.
48. Чинкин, В.Б. О составе огарков, образующихся при обжиге цинковых концентратов в печах кипящего слоя / В.Б. Чинкин, В.Л. Кубасов, В.Ф. Травкин // Цветная металлургия. — 2010. — № 4. — С. 25–32.
49. Лакерник, М.М. Металлургия цинка и кадмия / М.М. Лакерник, Г.Н. Пахомова. — М.: Металлургия, 1972. — 271 с.
50. Смирнов, Ю.М. Гидрометаллургия цинка: Учеб. пособие / Ленингр. горн. ин-т им. Г.В. Плеханова. — Л.: ЛГИ, 1978. — 95 с.
51. Пензимонж, И.И. О воспламенении сульфидов металлов / И.И. Пензимонж // Цветные металлы. — 1956. — №9. — С. 54–62.
52. Avila, I. Use of a fluidized bed combustor and thermogravimetric analyzer for the study of coal ignition temperature / I. Avila, P.M. Crnkovic, S.M.R. Luna, F.E. Milioli // Applied Thermal Engineering. — 2017. — Vol. 114. — P. 984–992.
53. Диев, Н.П. Металлургия свинца и цинка: Учеб. пособие для техникумов. — М.: Metallurgizdat, 1961. — 406 с.
54. Металлургия свинца и цинка: Учеб. пособие / А.К. Орлов. Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет). — СПб, 2004. — 71 с.

55. Орлов, А.К. Стадийность окисления сульфидов при окислительном обжиге полиминеральных сульфидных концентратов / А.К. Орлов // Изд. Зап. горного инс-та. — 2006. — №169. — С. 163–166.
56. Olek, M. Production of roasted zinc concentrates by thermal treatment in fluidized bed. Part 2. Kinetic studies on ZnS oxidation in fluidized bed reactor / M. Olek, J. Baron, J. Zabaglo, W. Zukowski, A. Jarosinski, S. Zelazny, M. Fatyga // *Przemysl Chemiczny*. — 2011. — Vol. 90. — P. 965–969.
57. Shu, J. Sintering and ferrite formation during high temperature roasting of sulfide concentrates / J. Shu, V.I. Lakshmanan, J. Convey // *Canadian metallurgical quarterly*. — 1999. — Vol. 38. — P. 215–225.
58. Chen, T.T. Mineralogical changes occurring during the fluid-bed roasting of zinc sulfide concentrates / T.T. Chen, J.E. Dutrizac // *JOM*. — 2004. — Vol. 56. — P. 46–51.
59. Graydon, J.W. A Microscopic study of the transformation of sphalerite particles during the roasting of zinc concentrate / J.W. Graydon, D.W. Kirk // *Metallurgical Transactions B*. — 1998. — Vol. 19. — P. 141–146.
60. Graydon, J.W. The mechanism of ferrite formation from iron sulfides during zinc roasting / J.W. Graydon, D.W. Kirk // *Metallurgical Transactions B*. — 1988. Vol. 19. — P. 777–785.
61. Сергеев, Г.И. Влияние высокотемпературного обжига цинковых концентратов на процесс ферритообразования цинка / Г.И. Сергеев [и др.] // *Известия ВУЗов. Цветная металлургия*. — 1984. — №5. — С. 67–71.
62. Liu, G.-W. Experimental study on combustion characteristics of coals under enriched-oxygen condition by thermo-gravimetric analysis / G.-W. Liu, P. Dong Y.-F. Han, R.-S. Bie // *Harbin Gongye Daxue Xuebao/Journal of Harbin Institute of Technology*. — 2011. — Vol. 43. — P. 104–108.
63. Piere J. Agglomeration zinc calcine during the fluid-bed roasting. (Причины агломерации цинкового огарка в печах кипящего слоя.) / J. Piere, S.C. Bouffard, J.R. Orace // *Mineral Engineering*. — 2011. — № 24. — P. 1409–1420.

64. Benlyamani, M. Agglomeration of particles during roasting of zinc sulfide concentrates / M. Benlyamani, F. Ajersch // Metallurgical Transactions B. 1986. — Vol. 17. — P. 647–656.
65. Ryabov G. A. Agglomeration during Fluidized Bed Combustion and Gasification of Fuels / G.A. Ryabov, D. S. Litun // Thermal Engineering. — 2019. — Vol. 66. — No 9. — P. 635-651.
66. Vyazovkin, S. ICTAC kinetics committee recommendations for performing kinetic computations on thermal analysis data / S. Vyazovkin, A.K. Burnham, J.M. Criado, L.A. Perez-Maqueda, C. Popescu, N. Sbirrazzuoli // Thermochimica Acta. — Vol. 520. — P. 1–19.
67. Анализ технологических решений для ПГУ с внутрицикловой газификацией угля: [монография] / под ред. А.Ф. Рыжкова. — Екатеринбург: Изд-во Урал. Унта, 2016. — 564 с.
68. Сур, Н.М., Siller, C.W., Steele, F.: AIME Trans., 1964. — Vol. 200. — P. 900.
69. Trojan, J., Vanecek, V.: Chem. Prumsyl. — 1963. — Vol. 13 — P. 193.
70. Максимов, Д.Б. Обжиг в печах КС медного флотоконцентрата от разделения фанштейна / Д.Б. Максимов [и др.] // Цветные металлы. — 2003. — №5. — С. 22–26.
71. Блатов, И.А. Исследование кинетики окисления медно-никелевого сульфидного концентрата / И.А. Блатов, В.В. Клементьев, А.Б. Портов, Л.Ш. Цемехман // Цветные металлы. — 1995. — №4. — С. 48–50.
72. Яценко, В.Н. Особенности кинетики и механизма окисления пирротина газовыми смесями, содержащими кислород / В.Н. Яценко, А.Б. Портов, Л.Н. Ерцева, Л.Ш. Цемехман // Цветные металлы. — 2004. — №12. — С. 46–51.
73. Баскаков, А.П. Исследование динамики выгорания твердого топлива в псевдооживленном слое мелкодисперсных инертных частиц / А.П. Баскаков, В.А. Мунц, А.А. Ашихмин // Физика горения и взрыва. — 1983. — №5. — С. 60–62.
74. Лейзерович, Г.Я. Скорость окисления сфалерита и марматита в кипящем слое / Г.Я. Лейзерович, И.В. Бабина // Цветные металлы. — 1950. — №3. — С. 32–36.

75. Lemperle, M. On the phase boundary reaction of zinc sulphide with oxygen. (Взаимодействие сульфида цинка с кислородом на границе фаз.) / M. Lemperle, I. Yusofoglu // «Erzmetall». — 1985. — Vol. 38. — №10. — P. 499–505.
76. Данилин, Л.А. Математическая модель процесса окисления сульфидного цинкового концентрата в кипящем слое / Л.А. Данилин // Известия ВУЗов. Цветная металлургия. — 1982. — №2. — С. 110–115.
77. Ротац, В.Я. Теория автоматического управления: учебник. — 5-е изд., перераб. и доп. — М.: Издательский дом МЭИ, 2008. — 396 с., ил.
78. Бесекерский, В.А. Теория систем автоматического управления / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. — Спб.: Профессия, 2003. — 752 с.
79. Ferreau, H.J. Embedded optimization methods for industrial automatic control / H.J. Ferreau, S. Almer, R. Verschueren, M. Diehl, D. Frick, A. Domahidi, J.L. Jerez, G. Stathopoulos, C. Jones // IFAC-PapersOnLine. — 2017. — Vol. 50. — P. 13194–13209.
80. Мунц, В.А. Топка с кипящим слоем как объект регулирования / В.А. Мунц, Н.Ф. Филипповский, А.П. Баскаков // Теплоэнергетика. — 1998. — №6. — С. 15–19.
81. Nyberg, J. Characterization and control of zinc roasting process / J. Nyberg // Finland: Oulu, 2004. — P. 114.
82. Плетнев, Г.П. Автоматическое управление и защита теплоэнергетических установок электростанций: Учебник для техникумов. — 3-е изд., перераб. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 344 с.: ил.
83. Пат. 2265779 РФ МПК F27 B15/18. Российская Федерация. Способ автоматического управления процессом обжига металлургического сырья в печи кипящего слоя / З.Г. Салихов [и др.]. Оpubл. 10.12.2005.
84. Svens, K. Recent experiences with modern zinc processing technology. (Последние достижения в совершенствовании технологией производства цинка.) / K. Svens, B. Kerstiens, M. Runkel // «Erzmetall». — 2003. — №2. — P. 94–103.

85. Рафалович, И.М. Использование тепла и регулирование температуры кипящего слоя в печах для обжига / Центр. ин-т информ. цв. металлургии. — М.: Б. и., 1957. — 51 с.
86. Добкин, В.М. Автоматическое регулирование тепловых процессов на электростанциях / В.М. Добкин, Е.М. Дулеев, Е.П. Фельдман. — М.: Госэнергоиздат, 1959. — 399 с.
87. Данилин, Л.А. О возможности управления процессом обжига цинковых концентратов в печи кипящего слоя по выходному параметру / Л.А. Данилин, А.С. Муравьева // Научные труды Моск. института стали и сплавов. — 1981. — №128. — С. 143–147.
88. Данилин, Л.А. Критерии оптимального управления процессом обжига сульфидных цинковых концентратов в печах кипящего слоя / Л.А. Данилин // Цветные металлы. — 1983. — №1. — С. 38–41.
89. Топчаев, В.П. Автоматизация технологических процессов цинкового производства / В.П. Топчаев, А.А. Саакянц // Цветные металлы. — 1996. — №2. — С. 73–74.
90. Буровой, И.А. Автоматическое регулирование процессов в кипящем слое в цветной металлургии: Докл. на Первом Междунар. конгрессе ИФАК по автоматическому упр. / Междунар. федерация по автоматическому упр. — М.: Изд-во Акад. наук, 1960. — 21 с.
91. Карлов, В.И. Обжиг цинкового концентрата в печах КС. Технологический расчёт. — Владикавказ, СКГТУ, 2001.
92. Худяков, И.Ф. Оборудование металлургических заводов / И.Ф. Худяков, В.П. Голдобин. — Свердловск, Издательство УПИ, 1976. — 272 с.
93. Кубасов, В.Л. Расчет критических скоростей в печах кипящего слоя / В.Л. Кубасов [и др.] // Цветные металлы. — 2007. — №8 — С. 41–45.
94. Синхронный термический анализ (Термогравиметрия и ДСК) // NETZSCH-Gerätebau GmbH [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.netzsch-thermal-analysis.com/ru/produkty-reshenija/sinkhronnyi-termicheskii-analiz/> (Дата обращения: 21.01.2020).

95. Мунц, В.А. Газообразование при обжиге цинкового концентрата в кипящем слое / В.А. Мунц, С.А. Ивакина (Шолохова), В.М. Терентьев // Цветные металлы. — 2017. — № 2. — С. 40–45; 0,37 п.л./0,2 п.л. / Munts V.A. Gas generation during the zinc concentrate annealing / V.A. Munts, S.A. Ivakina (Sholokhova), V.M. Terentev // Tsvetnye Metally. — 2017. — № 2. — P. 40–45.
96. Мунц, В.А. Использование закономерностей выгорания углей для описания обжига цинковых концентратов в кипящем слое [электронный ресурс] / В.А. Мунц, С.А. Ивакина (Шолохова) // материалы IX Всероссийской конференции с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения». Новосибирск, 16–18 ноября 2015 г. — Новосибирск, 2015. — Режим доступа: http://www.itp.nsc.ru/conferences/gt-2015/files/D2_L3.pdf. (Дата обращения: 21.01.2020).
97. Новицкий, П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. — Л.: Энергоатомиздат, 1991. — 304 с.
98. Мунц, В.А. Определение кинетических характеристик окисления сульфида цинка / В.А. Мунц, С.А. Ивакина (Шолохова) // Международный союз ученых «Наука. Технологии. Производство». — 2015. — № 3 (7), ч. 2. — С. 34–37.
99. Канторович, Б.В. Основы теории горения и газификации твердого топлива / Б.В. Канторович. — М.: Издательство АН СССР, 1958. — 598 с.
100. Prins, W. Fluidised bed combustion of a single carbon particle // The Netherlands. Quick Service Drukkerij Enschede. — 1987. — 258 p.
101. Feng, B. Activation energy distribution of thermal annealing of a bituminous coal / B. Feng, A. Jensen, S.K. Bhatia, K. Dam-Johansen // Energy and Fuels. — 2003. — Vol. 17(2). — P. 399–404.
102. Miura, K. A simple method for estimating $f(E)$ and $k_0(E)$ in the distributed activation energy model / K. Miura, T. Maki // Energy and Fuels. — 1998. — Vol. 12. — P. 864–869.
103. Бабий, В.И. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела / В.И. Бабий, Ю.Ф. Куваев. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 208 с.

104. Хитрин, Л.Н. Физика горения и взрыва / Л.Н. Хитрин. — М.: Изд-во Московского ун-та, 1957. — 452 с.
105. Jorgensen, F.R.A. Phases formed during the thermal analysis of pyrite in air / F.R.A. Jorgensen, F.J. Moyle // *Journal of Thermal Analysis*. — 1982. — Vol. 25. — P. 473–485.
106. Aracena, A. Pyrite oxidation kinetics in an oxygen–nitrogen atmosphere at temperatures from 400 to 500°C / A. Aracena, O. Jerez, R. Ortiz, J. Morales // *Canadian Metallurgical Quarterly*. — 2016. — Vol. 55. — P. 195–201.
107. Федотов, В.М. Особенности фазовых переходов при окислении сфалерита при температуре 973 К / В.М. Федотов, Н.М. Комков, В.А. Луганов // Новокузнецк: Изд-во СибГИУ. — Труды Всероссийской научно- практической конференции. *Металлургия: реорганизация, управление, инновации, качество*. — 2003. — С. 89–92.
108. Паньшин, А.М. Кинетика окисления сульфидных цинковых концентратов / А.М. Паньшин, П.А. Козлов, В.М. Терентьев // *Цветные металлы*. — 2014. — №2. — С. 34–37.
109. Мунц, В.А. Расчет газообразования при горении твердого топлива в кипящем слое / В.А. Мунц, А.П. Баскаков, А.А. Ашихмин // *ИФЖ*. — 1988. — т. 54. — № 3. — С. 432–438.
110. Основы практической теории горения: Учебное пособие для вузов / В.В. Померанцев, К.М. Арефьев, Д.Б. Ахмедов и др.; Под ред. В.В. Померанцева. — Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1986. — 312 с.
111. Кнорре, Г.Ф. Теория топочных процессов / Г.Ф. Кнорре и др. — М.: Энергия, 1966. — 491 с.
112. Головина, Е.С. Высокотемпературное горение и газификация углерода. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 176 с.
113. Хзмалян, Д.М. Теория топочных процессов. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 352 с.

114. Мунц В.А. Закономерности горения топлив и образования оксидов азота в топках кипящего и циркуляционного кипящего слоя : автореферат дис. доктора техн. наук: 05.14.04. — Екатеринбург, 1999. — 48 с.
115. Ивакина (Шолохова), С.А. Печь кипящего слоя для обжига цинковых концентратов как объект регулирования / С.А. Ивакина (Шолохова), В.А. Мунц // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2018. — Т. 329, № 9. — С. 31–42.
116. Торопов, Е.В. Математическая модель теплообмена в зоне интенсивного горения котельного агрегата / Е.В. Торопов, К.В. Осинцев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Энергетика. — 2015. — Т. 15, № 4. — С. 19-25.
117. Мунц, В.А. Изучение кинетики окисления сульфидного цинкового концентрата в печи кипящего слоя / В.А. Мунц, С.А. Ивакина (Шолохова), Д.Б. Чойнзон // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». — 2017. — Т. 17, № 3. — С. 34–42.
118. Sofekun, O.A. High-temperature oxidation of zinc sulfide: Kinetic modeling under conditions of strict kinetic control / O.A. Sofekun, L.K. Doraiswamy // Industrial and Engineering Chemistry Research. — 1996. — Vol. 35. — P. 3163–3170.
119. Долиненко, В.В. Уточнение инерционных свойств термопар, применяемых при исследовании металлургических и сварочных процессов / В. В. Долиненко, Е. В. Шаповалов, В. А. Коляда, А. В. Гнатушенко, В. В. Якуша // Современная электрометаллургия. — 2012. — № 4. — С. 33–36.
120. Рогельберг, И.Л. Сплавы для термопар. Справ. изд. / И.Л. Рогельберг, В. Бейлин. — М.: Металлургия, 1983. — 360 с.
121. Ключев, А.С. Настройка средств автоматизации и автоматических систем регулирования. Справочное пособие под ред. А.С. Ключева. — 2-е изд. перераб. и доп. / А.С. Ключев, А.Т. Лебедев, С.А. Ключев, А.Г. Товарнов. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 368 с., ил.



454008, г. Челябинск, Свердловский тракт, 24
Телефон: (351) 799-00-00, (351) 799-00-09
Телефакс: (351) 799-00-65
ИНН 7448000013 КПП 997550001
Р/с 40702810600000002944
в ООО КБ «Кольцо Урала», г. Екатеринбург
К/с 30101810500000000768 БИК 046577768

Исх. № 1404925 от 01.10.2019
На № _____ от _____

В диссертационный совет УрФУ 05.05.12
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.
Ельцина»

СПРАВКА

о возможности реализации результатов диссертационной работы Ивакиной С.А.

В диссертационной работе Ивакиной Светланы Анатольевны, посвященной изучению переходных процессов в печи кипящего слоя для обжига цинковых концентратов, рассмотрена задача изучения кинетики окисления сульфидного цинкового концентрата. Автором на основе экспериментальных исследований определены кинетические характеристики шихты (константа скорости химического реагирования, энергия активации, предэкспоненциальный множитель), на основании которых определена зависимость концентрации горючих в слое от расхода шихты и концентрации кислорода в дутье. Полученные данные могут послужить основой для уточнения инженерных методик расчета выбора режимных параметров.

На основании изученной кинетики окисления шихты разработана математическая модель переходных процессов в печи кипящего слоя для обжига цинковых концентратов. Созданная математическая модель достаточно хорошо описывает зависимость изменения температуры слоя и концентрации горючих веществ в нем от изменения расхода загружаемой в печь шихты в исследуемой энергетической установке. С помощью разработанной математической модели можно с достаточной точностью определить температуру слоя и концентрацию горючих веществ в нем при изменении расхода загружаемой в печь шихты.

Также в работе был предложен алгоритм регулятора температуры кипящего слоя с оптимальными настройками, который планируется к внедрению.

Директор ПАО «ЧЦЗ»
К.ю.н.

П.А. Избрехт

Экспериментальные данные

Общие условия проведения экспериментов: нагрев со скоростью 20 °С/мин в среде аргона с расходом 6 нл/час, окисление воздухом с расходом 8 нл/час в изотермическом режиме.

τ , мин	m , %	τ , мин	m , %	τ , мин	m , %	τ , мин	m , %	τ , мин	m , %	τ , мин	m , %
ZnS: $T = 900$ °С, $\delta = 100$ мкм, $m_0 = 10,4$ мг											
0	100,00	10,5	99,34	21	95,30	31,5	94,58	42	93,40	50,45	87,67
0,25	99,93	10,75	99,30	21,25	95,26	31,75	94,57	42,25	93,38	50,5	87,06
0,5	99,90	11	99,27	21,5	95,24	32	94,55	42,5	93,34	50,55	86,44
0,75	99,87	11,25	99,21	21,75	95,21	32,25	94,53	42,75	93,32	50,6	85,83
1	99,85	11,5	99,13	22	95,17	32,5	94,51	43	93,28	50,65	85,24
1,25	99,83	11,75	99,05	22,25	95,14	32,75	94,49	43,25	93,24	50,7	84,66
1,5	99,81	12	98,96	22,5	95,11	33	94,47	43,5	93,20	50,75	84,11
1,75	99,81	12,25	98,83	22,75	95,09	33,25	94,43	43,75	93,14	50,8	83,59
2	99,81	12,5	98,72	23	95,09	33,5	94,40	44	93,13	50,85	83,10
2,25	99,79	12,75	98,58	23,25	95,06	33,75	94,37	44,25	93,08	50,9	82,64
2,5	99,80	13	98,44	23,5	95,05	34	94,34	44,5	93,05	50,95	82,24
2,75	99,80	13,25	98,29	23,75	95,04	34,25	94,31	44,75	93,01	51	81,88
3	99,81	13,5	98,13	24	95,04	34,5	94,27	45	92,99	51,25	80,85
3,25	99,82	13,75	98,00	24,25	95,04	34,75	94,25	45,25	92,97	51,5	80,79
3,5	99,83	14	97,86	24,5	95,03	35	94,21	45,5	92,95	51,75	80,73
3,75	99,83	14,25	97,71	24,75	95,01	35,25	94,18	45,75	92,91	52	80,69
4	99,83	14,5	97,57	25	95,00	35,5	94,15	46	92,88	52,25	80,65
4,25	99,83	14,75	97,46	25,25	94,99	35,75	94,13	46,25	92,85	52,5	80,63
4,5	99,83	15	97,36	25,5	94,98	36	94,10	46,5	92,81	52,75	80,60
4,75	99,79	15,25	97,26	25,75	94,97	36,25	94,08	46,75	92,77	53	80,56
5	99,77	15,5	97,19	26	94,97	36,5	94,06	47	92,74	53,25	80,52
5,25	99,73	15,75	97,11	26,25	94,93	36,75	94,02	47,25	92,70	53,5	80,49
5,5	99,68	16	97,04	26,5	94,91	37	93,99	47,5	92,66	53,75	80,48
5,75	99,64	16,25	96,95	26,75	94,89	37,25	93,97	47,75	92,61	54	80,45
6	99,60	16,5	96,87	27	94,88	37,5	93,94	48	92,56	54,25	80,42
6,25	99,55	16,75	96,76	27,25	94,85	37,75	93,91	48,25	92,52	54,5	80,39
6,5	99,49	17	96,64	27,5	94,84	38	93,89	48,5	92,48	54,75	80,38
6,75	99,44	17,25	96,53	27,75	94,83	38,25	93,88	48,75	92,44	55	80,36
7	99,40	17,5	96,39	28	94,81	38,5	93,86	49	92,38	55,25	80,32
7,25	99,36	17,75	96,26	28,25	94,80	38,75	93,82	49,25	91,63	55,5	80,30
7,5	99,32	18	96,12	28,5	94,79	39	93,78	49,5	91,91	55,75	80,28
7,75	99,32	18,25	96,00	28,75	94,77	39,25	93,75	49,75	93,31		
8	99,30	18,5	95,90	29	94,75	39,5	93,72	50	92,84		
8,25	99,30	18,75	95,78	29,25	94,74	39,75	93,68	50	92,48		
8,5	99,28	19	95,70	29,5	94,72	40	93,66	50,05	92,12		
8,75	99,28	19,25	95,63	29,75	94,70	40,25	93,63	50,1	91,68		
9	99,29	19,5	95,57	30	94,66	40,5	93,62	50,15	91,19		
9,25	99,32	19,75	95,52	30,25	94,66	40,75	93,59	50,2	90,64		
9,5	99,33	20	95,46	30,5	94,63	41	93,56	50,25	90,07		
9,75	99,34	20,25	95,41	30,75	94,62	41,25	93,51	50,3	89,49		
10	99,34	20,5	95,37	31	94,60	41,5	93,47	50,35	88,89		
10,25	99,34	20,75	95,34	31,25	94,59	41,75	93,43	50,4	88,29		

τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %
ZnS: $T = 800\text{ }^\circ\text{C}$, $\delta = 100\text{ мкм}$, $m_0 = 10,7\text{ мг}$									
0	100,00	12,75	98,45	25,5	94,87	38,25	94,00	47	81,20
0,25	99,96	13	98,31	25,75	94,86	38,5	93,97	47,25	81,13
0,5	99,93	13,25	98,17	26	94,84	38,75	93,95	47,5	81,09
0,75	99,89	13,5	98,03	26,25	94,82	39	93,95	47,75	81,06
1	99,85	13,75	97,88	26,5	94,81	39,25	93,94	48	81,02
1,25	99,83	14	97,73	26,75	94,80	39,5	93,93	48,25	80,98
1,5	99,83	14,25	97,58	27	94,79	39,75	93,92	48,5	80,95
1,75	99,81	14,5	97,46	27,25	94,77	40	93,92	48,75	80,93
2	99,80	14,75	97,35	27,5	94,75	40,25	93,88	49	80,90
2,25	99,79	15	97,23	27,75	94,71	40,5	93,88	49,25	80,90
2,5	99,79	15,25	97,14	28	94,70	40,75	93,86	49,5	80,86
2,75	99,79	15,5	97,05	28,25	94,68	41	93,84	49,75	80,84
3	99,79	15,75	96,96	28,5	94,66	41,25	93,82	50	80,79
3,25	99,81	16	96,89	28,75	94,66	41,5	93,81	50,25	80,77
3,5	99,81	16,25	96,80	29	94,65	41,75	93,79	50,5	80,75
3,75	99,81	16,5	96,71	29,25	94,64	42	93,78	50,75	80,74
4	99,81	16,75	96,61	29,5	94,64	42,25	93,73	51	80,72
4,25	99,80	17	96,50	29,75	94,63	42,5	93,71		
4,5	99,79	17,25	96,36	30	94,62	42,75	93,69		
4,75	99,77	17,5	96,23	30,25	94,60	43	93,66		
5	99,73	17,75	96,08	30,5	94,58	43,25	93,64		
5,25	99,68	18	95,94	30,75	94,58	43,5	93,61		
5,5	99,64	18,25	95,83	31	94,58	43,75	93,58		
5,75	99,56	18,5	95,73	31,25	94,56	44	93,52		
6	99,50	18,75	95,64	31,5	94,53	44,25	92,36		
6,25	99,46	19	95,54	31,75	94,53	44,5	94,22		
6,5	99,41	19,25	95,48	32	94,50	44,75	94,24		
6,75	99,35	19,5	95,41	32,25	94,49	45	92,91		
7	99,31	19,75	95,36	32,5	94,48	45,05	92,38		
7,25	99,26	20	95,32	32,75	94,47	45,1	91,89		
7,5	99,22	20,25	95,28	33	94,45	45,15	91,39		
7,75	99,21	20,5	95,24	33,25	94,43	45,2	90,87		
8	99,18	20,75	95,21	33,5	94,41	45,25	90,35		
8,25	99,16	21	95,14	33,75	94,41	45,3	89,81		
8,5	99,16	21,25	95,10	34	94,38	45,35	89,26		
8,75	99,16	21,5	95,07	34,25	94,36	45,4	88,70		
9	99,19	21,75	95,04	34,5	94,34	45,45	88,14		
9,25	99,21	22	95,03	34,75	94,32	45,5	87,57		
9,5	99,22	22,25	95,00	35	94,28	45,55	87,01		
9,75	99,22	22,5	94,98	35,25	94,24	45,6	86,45		
10	99,23	22,75	94,96	35,5	94,24	45,65	85,89		
10,25	99,23	23	94,94	35,75	94,22	45,7	85,35		
10,5	99,21	23,25	94,94	36	94,20	45,75	84,83		
10,75	99,17	23,5	94,93	36,25	94,18	45,8	84,33		
11	99,13	23,75	94,93	36,5	94,16	45,85	83,85		
11,25	99,07	24	94,93	36,75	94,13	45,9	83,41		
11,5	99,02	24,25	94,90	37	94,12	45,95	83,00		
11,75	98,93	24,5	94,89	37,25	94,09	46	82,63		
12	98,81	24,75	94,88	37,5	94,07	46,25	81,45		
12,25	98,71	25	94,87	37,75	94,04	46,5	81,30		
12,5	98,59	25,25	94,87	38	94,01	46,75	81,23		

τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %
ZnS: $T = 700$ °C, $\delta = 100$ мкм, $m_0 = 10,5$ мг									
0	100,00	12,75	98,07	25,5	94,61	38,25	93,83	45	81,33
0,25	99,94	13	97,93	25,75	94,60	38,5	93,81	45,25	81,30
0,5	99,88	13,25	97,78	26	94,60	38,75	93,66	45,5	81,28
0,75	99,83	13,5	97,62	26,25	94,59	39	92,91	45,75	81,26
1	99,79	13,75	97,48	26,5	94,57	39,25	94,44	46	81,23
1,25	99,75	14	97,34	26,75	94,56	39,5	94,43	46,25	81,22
1,5	99,71	14,25	97,20	27	94,55	39,55	94,24	46,5	81,21
1,75	99,69	14,5	97,08	27,25	94,54	39,6	94,09	46,75	81,18
2	99,66	14,75	96,98	27,5	94,50	39,65	93,91	47	81,17
2,25	99,66	15	96,89	27,75	94,49	39,7	93,68	47,25	81,14
2,5	99,65	15,25	96,80	28	94,49	39,75	93,40	47,5	81,13
2,75	99,64	15,5	96,71	28,25	94,47	39,8	93,09	47,75	81,11
3	99,63	15,75	96,64	28,5	94,47	39,85	92,74	48	81,10
3,25	99,62	16	96,55	28,75	94,45	39,9	92,37	48,25	81,10
3,5	99,60	16,25	96,48	29	94,44	39,95	91,99	48,5	81,08
3,75	99,58	16,5	96,36	29,25	94,43	40	91,60	48,75	81,06
4	99,56	16,75	96,26	29,5	94,41	40,05	91,19	49	81,04
4,25	99,52	17	96,15	29,75	94,40	40,1	90,77	49,25	81,02
4,5	99,49	17,25	96,05	30	94,38	40,15	90,34	49,5	81,00
4,75	99,44	17,5	95,90	30,25	94,38	40,2	89,89	49,75	80,98
5	99,38	17,75	95,77	30,5	94,37	40,25	89,45	50	80,96
5,25	99,31	18	95,66	30,75	94,36	40,3	89,00	50,25	80,94
5,5	99,25	18,25	95,54	31	94,34	40,35	88,54	50,5	80,92
5,75	99,20	18,5	95,42	31,25	94,32	40,4	88,08	50,75	80,90
6	99,12	18,75	95,33	31,5	94,32	40,45	87,63	51	80,88
6,25	99,06	19	95,25	31,75	94,29	40,5	87,18	51,25	80,86
6,5	98,98	19,25	95,19	32	94,27	40,55	86,73	51,5	80,84
6,75	98,94	19,5	95,12	32,25	94,25	40,6	86,29	51,75	80,82
7	98,90	19,75	95,07	32,5	94,23	40,65	85,86	52	80,80
7,25	98,86	20	95,03	32,75	94,21	40,7	85,44	52,25	80,78
7,5	98,84	20,25	94,97	33	94,18	40,75	85,03	52,5	80,76
7,75	98,80	20,5	94,94	33,25	94,17	40,8	84,64	52,75	80,74
8	98,77	20,75	94,90	33,5	94,14	40,85	84,27	53	80,72
8,25	98,76	21	94,86	33,75	94,12	40,9	83,92	53,25	80,70
8,5	98,75	21,25	94,84	34	94,09	40,95	83,60	53,5	80,68
8,75	98,75	21,5	94,79	34,25	94,07	41	83,31	53,75	80,66
9	98,77	21,75	94,78	34,5	94,07	41,25	82,31	54	80,64
9,25	98,79	22	94,76	34,75	94,07	41,5	82,02	54,25	80,62
9,5	98,80	22,25	94,73	35	94,07	41,75	81,89	54,5	80,60
9,75	98,81	22,5	94,70	35,25	94,05	42	81,81	54,75	80,58
10	98,82	22,75	94,68	35,5	94,05	42,25	81,72	55	80,56
10,25	98,82	23	94,66	35,75	94,05	42,5	81,66	55,25	80,54
10,5	98,80	23,25	94,64	36	94,03	42,75	81,60	55,5	80,52
10,75	98,77	23,5	94,63	36,25	94,02	43	81,56	55,75	80,50
11	98,72	23,75	94,63	36,5	94,00	43,25	81,52	56	80,48
11,25	98,68	24	94,63	36,75	93,99	43,5	81,49	56,25	80,46
11,5	98,59	24,25	94,63	37	93,96	43,75	81,43	56,5	80,44
11,75	98,50	24,5	94,62	37,25	93,94	44	81,41	56,75	80,42
12	98,41	24,75	94,62	37,5	93,92	44,25	81,38	57	80,40
12,25	98,30	25	94,62	37,75	93,90	44,5	81,36	57,25	80,38
12,5	98,19	25,25	94,61	38	93,89	44,75	81,35	57,5	80,36

τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %
ZnS: $T = 900$ °C, $\delta = 300$ мкм, $m_0 = 10,3$ мг									
0	100,00	12,75	98,21	25,5	94,40	38,25	93,65	50,8	92,39
0,25	99,94	13	98,07	25,75	94,40	38,5	93,63	50,85	92,04
0,5	99,89	13,25	97,91	26	94,40	38,75	93,59	50,9	91,64
0,75	99,86	13,5	97,79	26,25	94,39	39	93,57	50,95	91,17
1	99,83	13,75	97,63	26,5	94,37	39,25	93,57	51	90,66
1,25	99,78	14	97,51	26,75	94,37	39,5	93,53	51,05	90,13
1,5	99,76	14,25	97,38	27	94,36	39,75	93,51	51,1	89,57
1,75	99,74	14,5	97,24	27,25	94,33	40	93,50	51,15	89,00
2	99,72	14,75	97,13	27,5	94,31	40,25	93,50	51,2	88,41
2,25	99,71	15	97,03	27,75	94,29	40,5	93,48	51,25	87,81
2,5	99,71	15,25	96,94	28	94,27	40,75	93,44	51,3	87,20
2,75	99,70	15,5	96,83	28,25	94,25	41	93,42	51,35	86,59
3	99,71	15,75	96,74	28,5	94,23	41,25	93,42	51,4	85,97
3,25	99,71	16	96,65	28,75	94,25	41,5	93,38	51,45	85,34
3,5	99,71	16,25	96,55	29	94,24	41,75	93,37	51,5	84,73
3,75	99,70	16,5	96,43	29,25	94,23	42	93,34	51,55	84,14
4	99,70	16,75	96,31	29,5	94,23	42,25	93,29	51,6	83,56
4,25	99,69	17	96,19	29,75	94,20	42,5	93,25	51,65	83,00
4,5	99,69	17,25	96,06	30	94,17	42,75	93,25	51,7	82,48
4,75	99,66	17,5	95,89	30,25	94,15	43	93,17	51,75	82,00
5	99,62	17,75	95,75	30,5	94,13	43,25	93,17	51,8	81,56
5,25	99,56	18	95,62	30,75	94,13	43,5	93,15	51,85	81,20
5,5	99,54	18,25	95,50	31	94,13	43,75	93,13	51,9	80,90
5,75	99,49	18,5	95,38	31,25	94,13	44	93,09	51,95	80,66
6	99,43	18,75	95,29	31,5	94,11	44,25	93,05	52	80,49
6,25	99,39	19	95,20	31,75	94,11	44,5	93,04	52,25	80,20
6,5	99,35	19,25	95,10	32	94,08	44,75	93,03	52,5	80,17
6,75	99,31	19,5	95,04	32,25	94,07	45	93,03	52,75	80,11
7	99,27	19,75	94,98	32,5	94,05	45,25	92,99	53	80,05
7,25	99,24	20	94,94	32,75	94,04	45,5	92,97	53,25	80,02
7,5	99,22	20,25	94,91	33	94,04	45,75	92,98	53,5	80,02
7,75	99,20	20,5	94,85	33,25	94,03	46	92,98	53,75	79,96
8	99,18	20,75	94,82	33,5	93,99	46,25	92,93	54	79,94
8,25	99,18	21	94,80	33,75	93,97	46,5	92,89	54,25	79,88
8,5	99,20	21,25	94,74	34	93,95	46,75	92,86	54,5	79,84
8,75	99,20	21,5	94,70	34,25	93,95	47	92,84	54,75	79,84
9	99,20	21,75	94,66	34,5	93,93	47,25	92,81	55	79,84
9,25	99,20	22	94,62	34,75	93,91	47,5	92,78	55,25	79,84
9,5	99,20	22,25	94,59	35	93,90	47,75	92,76	55,5	79,81
9,75	99,21	22,5	94,56	35,25	93,87	48	92,74	55,75	79,78
10	99,17	22,75	94,54	35,5	93,83	48,25	92,69		
10,25	99,14	23	94,51	35,75	93,83	48,5	92,63		
10,5	99,10	23,25	94,50	36	93,83	48,75	92,58		
10,75	99,03	23,5	94,50	36,25	93,81	49	92,55		
11	98,98	23,75	94,50	36,5	93,81	49,25	92,51		
11,25	98,90	24	94,46	36,75	93,77	49,5	92,48		
11,5	98,82	24,25	94,44	37	93,73	49,75	92,43		
11,75	98,70	24,5	94,44	37,25	93,73	50	91,04		
12	98,60	24,75	94,43	37,5	93,70	50,25	92,06		
12,25	98,48	25	94,41	37,75	93,68	50,5	93,20		
12,5	98,36	25,25	94,41	38	93,68	50,75	93,01		

τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %
ZnS: $T = 800$ °C, $\delta = 300$ мкм, $m_0 = 10,7$ мг									
0	100,00	12,75	98,83	25,5	95,46	38,25	94,21	45	82,35
0,25	99,96	13	98,70	25,75	95,44	38,5	94,19	45,25	82,29
0,5	99,94	13,25	98,57	26	95,44	38,75	94,17	45,5	82,24
0,75	99,93	13,5	98,42	26,25	95,43	39	94,11	45,75	82,21
1	99,91	13,75	98,28	26,5	95,41	39,25	94,09	46	82,19
1,25	99,91	14	98,15	26,75	95,40	39,5	94,06	46,25	82,14
1,5	99,91	14,25	98,05	27	95,37	39,75	94,06	46,5	82,08
1,75	99,91	14,5	97,92	27,25	95,36	40	94,04	46,75	82,07
2	99,93	14,75	97,80	27,5	95,36	40,25	94,00	47	82,07
2,25	99,97	15	97,71	27,75	95,34	40,5	93,98	47,25	82,04
2,5	99,99	15,25	97,61	28	95,34	40,75	93,97	47,5	82,00
2,75	100,01	15,5	97,53	28,25	95,32	41	93,93	47,75	81,97
3	100,05	15,75	97,45	28,5	95,30	41,25	93,89	48	81,93
3,25	100,07	16	97,38	28,75	95,28	41,5	93,89	48,25	81,91
3,5	100,09	16,25	97,30	29	95,27	41,75	93,83	48,5	81,88
3,75	100,10	16,5	97,20	29,25	95,27	42	93,81	48,75	81,86
4	100,11	16,75	97,10	29,5	95,24	42,25	93,75	49	81,85
4,25	100,11	17	96,99	29,75	95,22	42,5	93,72	49,25	81,84
4,5	100,11	17,25	96,88	30	95,22	42,75	92,88	49,5	81,82
4,75	100,11	17,5	96,77	30,25	95,19	43	94,68	49,75	81,80
5	100,09	17,75	96,62	30,5	95,18	43,05	94,604	50	81,77
5,25	100,07	18	96,50	30,75	95,16	43,1	94,623	50,25	81,75
5,5	100,03	18,25	96,37	31	95,14	43,15	94,594	50,5	81,73
5,75	99,97	18,5	96,26	31,25	95,12	43,2	94,507	50,75	81,71
6	99,93	18,75	96,18	31,5	95,09	43,25	94,353	51	81,71
6,25	99,89	19	96,10	31,75	95,08	43,3	94,141	51,25	81,68
6,5	99,83	19,25	96,05	32	95,05	43,35	93,876	51,5	81,64
6,75	99,79	19,5	95,98	32,25	95,02	43,4	93,553	51,75	81,62
7	99,74	19,75	95,93	32,5	94,98	43,45	93,173	52	81,62
7,25	99,69	20	95,87	32,75	94,96	43,5	92,743		
7,5	99,65	20,25	95,82	33	94,94	43,55	92,269		
7,75	99,64	20,5	95,80	33,25	94,89	43,6	91,775		
8	99,62	20,75	95,76	33,5	94,85	43,65	91,269		
8,25	99,59	21	95,72	33,75	94,83	43,7	90,752		
8,5	99,59	21,25	95,68	34	94,81	43,75	90,223		
8,75	99,59	21,5	95,64	34,25	94,77	43,8	89,683		
9	99,59	21,75	95,61	34,5	94,74	43,85	89,137		
9,25	99,61	22	95,59	34,75	94,71	43,9	88,584		
9,5	99,61	22,25	95,57	35	94,65	43,95	88,032		
9,75	99,62	22,5	95,55	35,25	94,64	44	87,477		
10	99,62	22,75	95,53	35,5	94,61	44,05	86,925		
10,25	99,61	23	95,49	35,75	94,56	44,1	86,380		
10,5	99,60	23,25	95,49	36	94,54	44,15	85,848		
10,75	99,57	23,5	95,49	36,25	94,52	44,2	85,331		
11	99,52	23,75	95,47	36,5	94,47	44,25	84,830		
11,25	99,47	24	95,47	36,75	94,43	44,3	84,352		
11,5	99,38	24,25	95,47	37	94,36	44,35	83,913		
11,75	99,27	24,5	95,46	37,25	94,36	44,4	83,529		
12	99,19	24,75	95,46	37,5	94,34	44,45	83,207		
12,25	99,07	25	95,46	37,75	94,32	44,5	82,946		
12,5	98,97	25,25	95,46	38	94,28	44,75	82,40		

τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %
ZnS: $T = 700$ °C, $\delta = 300$ мкм, $m_0 = 10,9$ мг									
0	100,00	12,75	97,20	25,5	93,50	38,25	92,58	43	79,85
0,25	99,92	13	97,08	25,75	93,49	38,5	92,53	43,25	79,78
0,5	99,85	13,25	96,93	26	93,44	38,75	92,51	43,5	79,75
0,75	99,80	13,5	96,79	26,25	93,44	39	92,50	43,75	79,72
1	99,74	13,75	96,63	26,5	93,44	39,25	92,20	44	79,68
1,25	99,72	14	96,49	26,75	93,44	39,5	91,20	44,25	79,66
1,5	99,69	14,25	96,34	27	93,42	39,75	92,21	44,5	79,66
1,75	99,64	14,5	96,22	27,25	93,39	40	92,92	44,75	79,60
2	99,61	14,75	96,11	27,5	93,39	40,05	92,93	45	79,58
2,25	99,58	15	96,02	27,75	93,35	40,1	92,92	45,25	79,59
2,5	99,55	15,25	95,92	28	93,34	40,15	92,91		
2,75	99,53	15,5	95,83	28,25	93,33	40,2	92,86		
3	99,51	15,75	95,76	28,5	93,33	40,25	92,77		
3,25	99,49	16	95,68	28,75	93,33	40,3	92,64		
3,5	99,45	16,25	95,59	29	93,30	40,35	92,48		
3,75	99,41	16,5	95,49	29,25	93,30	40,4	92,27		
4	99,38	16,75	95,37	29,5	93,27	40,45	92,03		
4,25	99,32	17	95,27	29,75	93,25	40,5	91,75		
4,5	99,24	17,25	95,13	30	93,23	40,55	91,44		
4,75	99,17	17,5	95,00	30,25	93,23	40,6	91,11		
5	99,09	17,75	94,85	30,5	93,21	40,65	90,77		
5,25	99,00	18	94,71	30,75	93,19	40,7	90,41		
5,5	98,92	18,25	94,59	31	93,17	40,75	90,05		
5,75	98,83	18,5	94,47	31,25	93,16	40,8	89,67		
6	98,73	18,75	94,38	31,5	93,14	40,85	89,28		
6,25	98,64	19	94,27	31,75	93,10	40,9	88,88		
6,5	98,57	19,25	94,18	32	93,06	40,95	88,46		
6,75	98,50	19,5	94,12	32,25	93,06	41	88,05		
7	98,42	19,75	94,05	32,5	93,06	41,05	87,62		
7,25	98,34	20	94,00	32,75	93,05	41,1	87,19		
7,5	98,29	20,25	93,95	33	93,01	41,15	86,76		
7,75	98,26	20,5	93,94	33,25	92,96	41,2	86,32		
8	98,22	20,75	93,89	33,5	92,93	41,25	85,89		
8,25	98,19	21	93,84	33,75	92,93	41,3	85,45		
8,5	98,19	21,25	93,82	34	92,87	41,35	85,01		
8,75	98,17	21,5	93,76	34,25	92,85	41,4	84,58		
9	98,17	21,75	93,74	34,5	92,84	41,45	84,15		
9,25	98,17	22	93,71	34,75	92,83	41,5	83,74		
9,5	98,16	22,25	93,68	35	92,85	41,55	83,33		
9,75	98,14	22,5	93,65	35,25	92,84	41,6	82,93		
10	98,13	22,75	93,63	35,5	92,83	41,65	82,55		
10,25	98,13	23	93,60	35,75	92,82	41,7	82,18		
10,5	98,08	23,25	93,60	36	92,82	41,75	81,85		
10,75	98,02	23,5	93,58	36,25	92,81	41,8	81,55		
11	97,97	23,75	93,54	36,5	92,79	41,85	81,26		
11,25	97,91	24	93,54	36,75	92,76	41,9	81,02		
11,5	97,83	24,25	93,54	37	92,72	41,95	80,81		
11,75	97,72	24,5	93,54	37,25	92,69	42	80,53		
12	97,61	24,75	93,53	37,5	92,69	42,25	80,11		
12,25	97,46	25	93,52	37,75	92,62	42,5	79,97		
12,5	97,32	25,25	93,50	38	92,60	42,75	79,90		

τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %
$ZnS: T = 900 \text{ }^\circ\text{C}, \delta = 515 \text{ мкм}, m_0 = 10,8 \text{ мг}$									
0	100,00	12,75	99,13	25,5	95,60	38,25	94,71	50,2	92,31
0,25	99,98	13	98,98	25,75	95,57	38,5	94,68	50,25	91,79
0,5	99,97	13,25	98,85	26	95,57	38,75	94,66	50,3	91,26
0,75	99,96	13,5	98,72	26,25	95,56	39	94,65	50,35	90,71
1	99,95	13,75	98,56	26,5	95,56	39,25	94,63	50,4	90,14
1,25	99,95	14	98,44	26,75	95,55	39,5	94,60	50,45	89,56
1,5	99,95	14,25	98,31	27	95,52	39,75	94,56	50,5	88,98
1,75	99,95	14,5	98,19	27,25	95,52	40	94,55	50,55	88,39
2	99,99	14,75	98,08	27,5	95,52	40,25	94,53	50,6	87,79
2,25	99,99	15	97,98	27,75	95,50	40,5	94,49	50,65	87,19
2,5	100,03	15,25	97,89	28	95,50	40,75	94,46	50,7	86,59
2,75	100,06	15,5	97,82	28,25	95,48	41	94,44	50,75	85,99
3	100,09	15,75	97,75	28,5	95,46	41,25	94,42	50,8	85,41
3,25	100,13	16	97,67	28,75	95,46	41,5	94,39	50,85	84,83
3,5	100,15	16,25	97,57	29	95,44	41,75	94,35	50,9	84,26
3,75	100,17	16,5	97,49	29,25	95,42	42	94,33	50,95	83,70
4	100,19	16,75	97,38	29,5	95,41	42,25	94,31	51	83,18
4,25	100,22	17	97,28	29,75	95,40	42,5	94,28	51,05	82,71
4,5	100,24	17,25	97,14	30	95,39	42,75	94,24	51,1	82,30
4,75	100,24	17,5	97,01	30,25	95,38	43	94,19	51,15	81,97
5	100,23	17,75	96,87	30,5	95,37	43,25	94,18	51,2	81,70
5,25	100,23	18	96,75	30,75	95,36	43,5	94,16	51,25	81,50
5,5	100,20	18,25	96,62	31	95,35	43,75	94,13	51,5	81,19
5,75	100,18	18,5	96,52	31,25	95,34	44	94,11	51,75	81,16
6	100,15	18,75	96,43	31,5	95,33	44,25	94,08	52	81,10
6,25	100,12	19	96,34	31,75	95,31	44,5	94,06	52,25	81,05
6,5	100,08	19,25	96,28	32	95,30	44,75	94,03	52,5	81,02
6,75	100,04	19,5	96,20	32,25	95,30	45	94,01	52,75	80,99
7	99,99	19,75	96,14	32,5	95,26	45,25	93,99	53	80,95
7,25	99,94	20	96,08	32,75	95,22	45,5	93,97	53,25	80,92
7,5	99,93	20,25	96,05	33	95,20	45,75	93,94	53,5	80,88
7,75	99,91	20,5	96,02	33,25	95,19	46	93,93	53,75	80,86
8	99,89	20,75	95,96	33,5	95,18	46,25	93,90	54	80,84
8,25	99,87	21	95,93	33,75	95,15	46,5	93,87	54,25	80,81
8,5	99,87	21,25	95,90	34	95,13	46,75	93,82	54,5	80,79
8,75	99,87	21,5	95,86	34,25	95,11	47	93,82	54,75	80,77
9	99,87	21,75	95,82	34,5	95,09	47,25	93,78	55	80,72
9,25	99,88	22	95,80	34,75	95,06	47,5	93,74	55,25	80,70
9,5	99,89	22,25	95,78	35	95,02	47,75	93,71	55,5	80,69
9,75	99,90	22,5	95,76	35,25	94,99	48	93,67	55,75	80,67
10	99,90	22,75	95,73	35,5	94,97	48,25	93,63		
10,25	99,90	23	95,70	35,75	94,94	48,5	93,59		
10,5	99,88	23,25	95,69	36	94,92	48,75	93,56		
10,75	99,84	23,5	95,67	36,25	94,90	49	93,26		
11	99,81	23,75	95,65	36,5	94,88	49,25	92,28		
11,25	99,73	24	95,65	36,75	94,84	49,5	92,30		
11,5	99,69	24,25	95,65	37	94,82	49,75	94,39		
11,75	99,59	24,5	95,65	37,25	94,81	50	94,18		
12	99,48	24,75	95,63	37,5	94,79	50,05	93,55		
12,25	99,38	25	95,62	37,75	94,77	50,1	93,20		
12,5	99,26	25,25	95,61	38	94,75	50,15	92,78		

τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %
ZnS: $T = 800$ °C, $\delta = 515$ МКМ, $m_0 = 10,4$ МГ									
0	100,00	12,75	98,50	25,5	95,11	38,25	94,38	45,8	84,29
0,25	99,95	13	98,38	25,75	95,10	38,5	94,38	45,85	83,84
0,5	99,91	13,25	98,24	26	95,09	38,75	94,36	45,9	83,42
0,75	99,89	13,5	98,11	26,25	95,08	39	94,34	45,95	83,04
1	99,88	13,75	97,98	26,5	95,06	39,25	94,32	46	82,69
1,25	99,84	14	97,84	26,75	95,06	39,5	94,29	46,05	82,40
1,5	99,83	14,25	97,72	27	95,04	39,75	94,27	46,1	82,15
1,75	99,83	14,5	97,61	27,25	95,04	40	94,28	46,15	81,96
2	99,83	14,75	97,50	27,5	95,04	40,25	94,28	46,2	81,81
2,25	99,83	15	97,39	27,75	95,00	40,5	94,28	46,25	81,70
2,5	99,83	15,25	97,34	28	95,00	40,75	94,28	46,5	81,55
2,75	99,83	15,5	97,25	28,25	95,00	41	94,28	46,75	81,50
3	99,83	15,75	97,19	28,5	94,98	41,25	94,26	47	81,46
3,25	99,83	16	97,12	28,75	94,98	41,5	94,24	47,25	81,43
3,5	99,85	16,25	97,02	29	94,96	41,75	94,22	47,5	81,40
3,75	99,85	16,5	96,92	29,25	94,95	42	94,21	47,75	81,38
4	99,85	16,75	96,83	29,5	94,95	42,25	94,18	48	81,33
4,25	99,85	17	96,71	29,75	94,95	42,5	94,17	48,25	81,31
4,5	99,84	17,25	96,59	30	94,93	42,75	94,14	48,5	81,29
4,75	99,81	17,5	96,45	30,25	94,92	43	94,12	48,75	81,25
5	99,76	17,75	96,33	30,5	94,91	43,25	94,06	49	81,22
5,25	99,72	18	96,19	30,75	94,91	43,5	94,02	49,25	81,20
5,5	99,70	18,25	96,09	31	94,90	43,75	93,99	49,5	81,19
5,75	99,65	18,5	95,95	31,25	94,89	44	92,62	49,75	81,14
6	99,59	18,75	95,86	31,5	94,89	44,25	93,43		
6,25	99,53	19	95,78	31,75	94,88	44,5	94,82		
6,5	99,48	19,25	95,72	32	94,86	44,55	94,78		
6,75	99,42	19,5	95,64	32,25	94,86	44,6	94,75		
7	99,38	19,75	95,59	32,5	94,84	44,65	94,67		
7,25	99,34	20	95,55	32,75	94,84	44,7	94,53		
7,5	99,32	20,25	95,49	33	94,82	44,75	94,34		
7,75	99,27	20,5	95,44	33,25	94,80	44,8	94,09		
8	99,26	20,75	95,40	33,5	94,78	44,85	93,79		
8,25	99,25	21	95,38	33,75	94,76	44,9	93,43		
8,5	99,25	21,25	95,35	34	94,74	44,95	93,02		
8,75	99,25	21,5	95,32	34,25	94,72	45	92,57		
9	99,27	21,75	95,30	34,5	94,71	45,05	92,09		
9,25	99,29	22	95,28	34,75	94,69	45,1	91,60		
9,5	99,30	22,25	95,24	35	94,65	45,15	91,09		
9,75	99,30	22,5	95,22	35,25	94,63	45,2	90,57		
10	99,30	22,75	95,20	35,5	94,62	45,25	90,04		
10,25	99,30	23	95,20	35,75	94,58	45,3	89,50		
10,5	99,27	23,25	95,17	36	94,55	45,35	88,95		
10,75	99,24	23,5	95,16	36,25	94,55	45,4	88,40		
11	99,19	23,75	95,15	36,5	94,53	45,45	87,85		
11,25	99,12	24	95,13	36,75	94,52	45,5	87,31		
11,5	99,03	24,25	95,13	37	94,48	45,55	86,78		
11,75	98,93	24,5	95,13	37,25	94,46	45,6	86,25		
12	98,85	24,75	95,13	37,5	94,46	45,65	85,73		
12,25	98,73	25	95,12	37,75	94,42	45,7	85,23		
12,5	98,62	25,25	95,12	38	94,39	45,75	84,75		

τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %
ZnS: $T = 700\text{ }^\circ\text{C}$, $\delta = 515\text{ мкм}$, $m_0 = 10,6\text{ мг}$									
0	100,00	12,75	98,75	25,5	95,27	38,25	94,42	43	82,02
0,25	99,96	13	98,62	25,75	95,27	38,5	94,41	43,25	81,96
0,5	99,94	13,25	98,49	26	95,27	38,75	94,36	43,5	81,92
0,75	99,92	13,5	98,34	26,25	95,26	39	94,33	43,75	81,89
1	99,91	13,75	98,19	26,5	95,25	39,25	94,29	44	81,87
1,25	99,90	14	98,05	26,75	95,24	39,5	93,31	44,25	81,83
1,5	99,90	14,25	97,93	27	95,22	39,75	94,44	44,5	81,79
1,75	99,89	14,5	97,80	27,25	95,20	40	94,98	44,75	81,77
2	99,89	14,75	97,69	27,5	95,18	40,05	94,98	45	81,75
2,25	99,91	15	97,59	27,75	95,16	40,1	94,97	45,25	81,74
2,5	99,95	15,25	97,53	28	95,16	40,15	94,94	45,5	81,70
2,75	99,96	15,5	97,43	28,25	95,14	40,2	94,88	45,75	81,68
3	99,98	15,75	97,35	28,5	95,12	40,25	94,77	46	81,66
3,25	100,01	16	97,26	28,75	95,10	40,3	94,62	46,25	81,64
3,5	100,05	16,25	97,20	29	95,09	40,35	94,43		
3,75	100,05	16,5	97,10	29,25	95,08	40,4	94,19		
4	100,07	16,75	97,00	29,5	95,08	40,45	93,92		
4,25	100,08	17	96,90	29,75	95,06	40,5	93,62		
4,5	100,10	17,25	96,77	30	95,04	40,55	93,29		
4,75	100,09	17,5	96,65	30,25	95,02	40,6	92,94		
5	100,07	17,75	96,51	30,5	95,02	40,65	92,59		
5,25	100,05	18	96,39	30,75	95,00	40,7	92,23		
5,5	100,01	18,25	96,27	31	95,00	40,75	91,86		
5,75	99,97	18,5	96,16	31,25	95,00	40,8	91,48		
6	99,92	18,75	96,06	31,5	94,98	40,85	91,09		
6,25	99,86	19	95,96	31,75	94,96	40,9	90,69		
6,5	99,82	19,25	95,89	32	94,93	40,95	90,28		
6,75	99,75	19,5	95,82	32,25	94,92	41	89,86		
7	99,71	19,75	95,75	32,5	94,91	41,05	89,44		
7,25	99,67	20	95,71	32,75	94,88	41,1	89,00		
7,5	99,62	20,25	95,66	33	94,87	41,15	88,57		
7,75	99,60	20,5	95,61	33,25	94,83	41,2	88,13		
8	99,58	20,75	95,58	33,5	94,79	41,25	87,69		
8,25	99,56	21	95,56	33,75	94,77	41,3	87,25		
8,5	99,53	21,25	95,52	34	94,74	41,35	86,82		
8,75	99,55	21,5	95,50	34,25	94,72	41,4	86,40		
9	99,53	21,75	95,47	34,5	94,69	41,45	85,98		
9,25	99,55	22	95,44	34,75	94,68	41,5	85,58		
9,5	99,57	22,25	95,42	35	94,68	41,55	85,19		
9,75	99,57	22,5	95,41	35,25	94,68	41,6	84,82		
10	99,57	22,75	95,39	35,5	94,66	41,65	84,46		
10,25	99,57	23	95,35	35,75	94,66	41,7	84,13		
10,5	99,53	23,25	95,33	36	94,66	41,75	83,82		
10,75	99,51	23,5	95,33	36,25	94,64	41,8	83,54		
11	99,44	23,75	95,31	36,5	94,62	41,85	83,29		
11,25	99,39	24	95,31	36,75	94,60	41,9	83,07		
11,5	99,31	24,25	95,31	37	94,58	41,95	82,88		
11,75	99,22	24,5	95,30	37,25	94,55	42	82,73		
12	99,12	24,75	95,29	37,5	94,51	42,25	82,28		
12,25	99,00	25	95,28	37,75	94,49	42,5	82,16		
12,5	98,87	25,25	95,28	38	94,46	42,75	82,08		

τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %
ZnS: $T = 900$ °C, $\delta > 630$ мкм, $m_0 = 10,7$ мг									
0	100,00	12,75	98,79	25,5	95,61	38,25	95,03	48,4	90,23
0,25	99,99	13	98,68	25,75	95,58	38,5	95,00	48,45	89,68
0,5	99,97	13,25	98,54	26	95,58	38,75	94,97	48,5	89,13
0,75	99,97	13,5	98,42	26,25	95,60	39	94,96	48,55	88,56
1	99,95	13,75	98,28	26,5	95,59	39,25	94,94	48,6	88,01
1,25	99,95	14	98,16	26,75	95,58	39,5	94,92	48,65	87,45
1,5	99,93	14,25	98,05	27	95,57	39,75	94,89	48,7	86,90
1,75	99,93	14,5	97,94	27,25	95,56	40	94,87	48,75	86,35
2	99,95	14,75	97,85	27,5	95,56	40,25	94,85	48,8	85,81
2,25	100,00	15	97,76	27,75	95,54	40,5	94,83	48,85	85,28
2,5	100,02	15,25	97,67	28	95,54	40,75	94,81	48,9	84,77
2,75	100,01	15,5	97,58	28,25	95,52	41	94,79	48,95	84,27
3	100,05	15,75	97,52	28,5	95,50	41,25	94,77	49	83,79
3,25	100,07	16	97,45	28,75	95,50	41,5	94,74	49,05	83,33
3,5	100,08	16,25	97,37	29	95,49	41,75	94,68	49,1	82,89
3,75	100,11	16,5	97,27	29,25	95,47	42	94,64	49,15	82,49
4	100,11	16,75	97,16	29,5	95,47	42,25	94,63	49,2	82,12
4,25	100,14	17	97,06	29,75	95,47	42,5	94,60	49,25	81,80
4,5	100,16	17,25	96,92	30	95,44	42,75	94,55	49,3	81,53
4,75	100,15	17,5	96,78	30,25	95,42	43	94,48	49,35	81,31
5	100,15	17,75	96,62	30,5	95,41	43,25	94,48	49,4	81,13
5,25	100,13	18	96,50	30,75	95,41	43,5	94,40	49,45	81,00
5,5	100,11	18,25	96,40	31	95,41	43,75	94,37	49,5	80,91
5,75	100,09	18,5	96,29	31,25	95,39	44	94,34	49,75	80,78
6	100,07	18,75	96,20	31,5	95,38	44,25	94,27	50	80,71
6,25	100,04	19	96,12	31,75	95,35	44,5	94,26	50,25	80,66
6,5	100,00	19,25	96,06	32	95,35	44,75	94,23	50,5	80,62
6,75	99,96	19,5	95,99	32,25	95,35	45	94,20	50,75	80,59
7	99,91	19,75	95,93	32,5	95,31	45,25	94,16	51	80,53
7,25	99,88	20	95,91	32,75	95,30	45,5	94,14	51,25	80,50
7,5	99,83	20,25	95,87	33	95,30	45,75	94,10	51,5	80,50
7,75	99,79	20,5	95,81	33,25	95,30	46	94,08	51,75	80,49
8	99,78	20,75	95,79	33,5	95,28	46,25	94,05	52	80,43
8,25	99,76	21	95,78	33,75	95,25	46,5	94,01	52,25	80,39
8,5	99,77	21,25	95,76	34	95,25	46,75	93,98	52,5	80,38
8,75	99,75	21,5	95,72	34,25	95,21	47	93,94		
9	99,74	21,75	95,70	34,5	95,21	47,25	92,61		
9,25	99,74	22	95,70	34,75	95,19	47,5	92,46		
9,5	99,76	22,25	95,68	35	95,15	47,75	94,41		
9,75	99,76	22,5	95,68	35,25	95,15	47,8	94,36		
10	99,76	22,75	95,68	35,5	95,12	47,85	94,34		
10,25	99,71	23	95,66	35,75	95,10	47,9	94,25		
10,5	99,67	23,25	95,65	36	95,09	47,95	94,09		
10,75	99,61	23,5	95,65	36,25	95,07	48	93,87		
11	99,54	23,75	95,65	36,5	95,06	48,05	93,58		
11,25	99,47	24	95,64	36,75	95,06	48,1	93,23		
11,5	99,37	24,25	95,63	37	95,05	48,15	92,82		
11,75	99,28	24,5	95,63	37,25	95,05	48,2	92,35		
12	99,17	24,75	95,62	37,5	95,05	48,25	91,83		
12,25	99,05	25	95,61	37,75	95,03	48,3	91,30		
12,5	98,93	25,25	95,61	38	95,03	48,35	90,77		

τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %
$ZnS: T = 900 \text{ }^\circ\text{C}, \delta = 300 \text{ мкм}, m_0 = 10,1 \text{ мг}, C_{O_2} = 28 \%$									
0	100,00	12,75	99,38	25,5	96,12	38,25	95,64	49,4	92,70
0,25	100,01	13	99,27	25,75	96,09	38,5	95,63	49,45	92,01
0,5	99,98	13,25	99,11	26	96,11	38,75	95,63	49,5	91,28
0,75	99,98	13,5	98,99	26,25	96,11	39	95,62	49,55	90,53
1	99,97	13,75	98,87	26,5	96,12	39,25	95,60	49,6	89,77
1,25	99,95	14	98,72	26,75	96,09	39,5	95,60	49,65	88,99
1,5	99,96	14,25	98,60	27	96,09	39,75	95,60	49,7	88,20
1,75	99,99	14,5	98,50	27,25	96,06	40	95,60	49,75	87,41
2	100,00	14,75	98,41	27,5	96,07	40,25	95,60	49,8	86,63
2,25	100,00	15	98,32	27,75	96,04	40,5	95,58	49,85	85,87
2,5	100,05	15,25	98,25	28	96,06	40,75	95,54	49,9	85,12
2,75	100,05	15,5	98,17	28,25	96,06	41	95,51	49,95	84,41
3	100,09	15,75	98,06	28,5	96,06	41,25	95,48	50	83,74
3,25	100,13	16	97,98	28,75	96,05	41,5	95,48	50,05	83,14
3,5	100,14	16,25	97,90	29	96,04	41,75	95,44	50,1	82,61
3,75	100,19	16,5	97,81	29,25	96,03	42	95,45	50,15	82,17
4	100,21	16,75	97,67	29,5	96,03	42,25	95,42	50,2	81,82
4,25	100,23	17	97,54	29,75	96,02	42,5	95,44	50,25	81,54
4,5	100,23	17,25	97,40	30	96,01	42,75	95,41	50,5	81,10
4,75	100,27	17,5	97,28	30,25	96,00	43	95,38	50,75	81,01
5	100,27	17,75	97,17	30,5	95,96	43,25	95,36	51	80,97
5,25	100,29	18	97,04	30,75	95,96	43,5	95,35	51,25	80,88
5,5	100,30	18,25	96,94	31	95,96	43,75	95,29	51,5	80,83
5,75	100,28	18,5	96,85	31,25	95,96	44	95,27	51,75	80,80
6	100,28	18,75	96,74	31,5	95,94	44,25	95,24	52	80,76
6,25	100,25	19	96,68	31,75	95,93	44,5	95,19	52,25	80,72
6,5	100,20	19,25	96,63	32	95,92	44,75	95,21	52,5	80,68
6,75	100,18	19,5	96,55	32,25	95,92	45	95,21	52,75	80,65
7	100,12	19,75	96,52	32,5	95,92	45,25	95,20	53	80,54
7,25	100,08	20	96,49	32,75	95,92	45,5	95,18	53,25	80,54
7,5	100,07	20,25	96,43	33	95,92	45,75	95,20	53,5	80,50
7,75	100,05	20,5	96,39	33,25	95,90	46	95,16	53,75	80,46
8	100,04	20,75	96,37	33,5	95,89	46,25	95,16	54	80,39
8,25	100,03	21	96,33	33,75	95,87	46,5	95,11	54,25	80,41
8,5	100,03	21,25	96,31	34	95,87	46,75	95,11	54,5	80,38
8,75	100,03	21,5	96,28	34,25	95,87	47	95,05		
9	100,05	21,75	96,26	34,5	95,85	47,25	95,05		
9,25	100,07	22	96,23	34,75	95,81	47,5	94,97		
9,5	100,07	22,25	96,23	35	95,82	47,75	94,96		
9,75	100,07	22,5	96,21	35,25	95,79	48	94,90		
10	100,09	22,75	96,17	35,5	95,77	48,25	94,87		
10,25	100,08	23	96,19	35,75	95,76	48,5	94,47		
10,5	100,07	23,25	96,19	36	95,77	48,75	93,52		
10,75	100,04	23,5	96,19	36,25	95,77	49	95,36		
11	99,99	23,75	96,19	36,5	95,73	49,05	95,26		
11,25	99,94	24	96,19	36,75	95,74	49,1	95,17		
11,5	99,87	24,25	96,17	37	95,71	49,15	94,97		
11,75	99,79	24,5	96,17	37,25	95,69	49,2	94,69		
12	99,67	24,75	96,13	37,5	95,70	49,25	94,33		
12,25	99,57	25	96,13	37,75	95,68	49,3	93,87		
12,5	99,48	25,25	96,11	38	95,65	49,35	93,33		

τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %
$ZnS: T = 700 \text{ }^\circ\text{C}, \delta = 300 \text{ мкм}, m_0 = 10,6 \text{ мг}, C_{O_2} = 28 \%$									
0	100,00	12,75	99,38	25,5	96,32	38,25	95,93	45	82,65
0,25	99,98	13	99,21	25,75	96,30	38,5	95,92	45,25	82,64
0,5	99,98	13,25	99,07	26	96,30	38,75	95,90	45,5	82,63
0,75	99,98	13,5	98,93	26,25	96,29	39	95,86	45,75	82,57
1	99,96	13,75	98,80	26,5	96,28	39,25	95,86	46	82,54
1,25	99,96	14	98,69	26,75	96,28	39,5	95,84	46,25	82,51
1,5	99,96	14,25	98,58	27	96,28	39,75	95,78	46,5	82,48
1,75	99,96	14,5	98,47	27,25	96,28	40	95,74	46,75	82,46
2	99,98	14,75	98,38	27,5	96,26	40,25	95,74	47	82,44
2,25	100,02	15	98,31	27,75	96,26	40,5	95,71	47,25	82,42
2,5	100,02	15,25	98,23	28	96,26	40,75	95,70	47,5	82,39
2,75	100,06	15,5	98,18	28,25	96,25	41	95,70	47,75	82,36
3	100,09	15,75	98,09	28,5	96,23	41,25	95,63	48	82,36
3,25	100,10	16	98,03	28,75	96,23	41,5	95,62	48,25	82,31
3,5	100,13	16,25	97,93	29	96,23	41,75	95,59	48,5	82,29
3,75	100,15	16,5	97,84	29,25	96,22	42	94,65	48,75	82,26
4	100,19	16,75	97,75	29,5	96,23	42,25	95,89		
4,25	100,19	17	97,64	29,75	96,21	42,5	95,84		
4,5	100,23	17,25	97,52	30	96,22	42,55	95,79		
4,75	100,24	17,5	97,38	30,25	96,22	42,6	95,69		
5	100,25	17,75	97,25	30,5	96,22	42,65	95,55		
5,25	100,24	18	97,15	30,75	96,19	42,7	95,37		
5,5	100,28	18,25	97,04	31	96,20	42,75	95,13		
5,75	100,29	18,5	96,92	31,25	96,19	42,8	94,85		
6	100,25	18,75	96,84	31,5	96,17	42,85	94,50		
6,25	100,24	19	96,75	31,75	96,18	42,9	94,10		
6,5	100,19	19,25	96,72	32	96,18	42,95	93,66		
6,75	100,15	19,5	96,68	32,25	96,15	43	93,20		
7	100,14	19,75	96,64	32,5	96,15	43,05	92,71		
7,25	100,08	20	96,58	32,75	96,15	43,1	92,20		
7,5	100,06	20,25	96,56	33	96,13	43,15	91,66		
7,75	100,04	20,5	96,52	33,25	96,12	43,2	91,11		
8	100,02	20,75	96,47	33,5	96,11	43,25	90,55		
8,25	100,03	21	96,45	33,75	96,08	43,3	89,97		
8,5	100,03	21,25	96,44	34	96,08	43,35	89,37		
8,75	100,03	21,5	96,42	34,25	96,08	43,4	88,77		
9	100,05	21,75	96,40	34,5	96,08	43,45	88,18		
9,25	100,08	22	96,38	34,75	96,08	43,5	87,59		
9,5	100,08	22,25	96,38	35	96,08	43,55	87,02		
9,75	100,11	22,5	96,38	35,25	96,08	43,6	86,47		
10	100,10	22,75	96,36	35,5	96,06	43,65	85,95		
10,25	100,09	23	96,34	35,75	96,08	43,7	85,47		
10,5	100,08	23,25	96,35	36	96,08	43,75	85,02		
10,75	100,05	23,5	96,34	36,25	96,08	43,8	84,63		
11	99,98	23,75	96,34	36,5	96,08	43,85	84,28		
11,25	99,95	24	96,33	36,75	96,03	43,9	83,99		
11,5	99,85	24,25	96,33	37	96,04	43,95	83,73		
11,75	99,79	24,5	96,34	37,25	96,02	44	83,53		
12	99,68	24,75	96,33	37,5	96,00	44,25	82,94		
12,25	99,57	25	96,32	37,75	95,98	44,5	82,82		
12,5	99,47	25,25	96,32	38	95,98	44,75	82,74		

τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %
FeS ₂ : $T = 900$ °C, $\delta = 100$ МКМ, $m_0 = 10,9$ МГ									
0	100,00	12,75	101,01	25,5	95,87	38,25	76,80	48,4	72,74
0,25	99,99	13	101,08	25,75	95,72	38,5	76,77	48,45	72,36
0,5	99,97	13,25	101,15	26	95,57	38,75	76,72	48,5	71,98
0,75	99,97	13,5	101,21	26,25	95,31	39	76,67	48,55	71,61
1	99,99	13,75	101,25	26,5	95,01	39,25	76,64	48,6	71,27
1,25	99,99	14	101,28	26,75	94,64	39,5	76,58	48,65	70,94
1,5	100,01	14,25	101,34	27	94,12	39,75	76,53	48,7	70,65
1,75	100,04	14,5	101,39	27,25	93,49	40	76,51	48,75	70,37
2	100,07	14,75	101,42	27,5	92,70	40,25	76,45	48,8	70,11
2,25	100,09	15	101,50	27,75	91,81	40,5	76,42	48,85	69,87
2,5	100,11	15,25	101,52	28	90,64	40,75	76,39	48,9	69,66
2,75	100,13	15,5	101,54	28,25	89,30	41	76,35	48,95	69,48
3	100,17	15,75	101,56	28,5	87,72	41,25	76,32	49	69,31
3,25	100,22	16	101,59	28,75	85,83	41,5	76,28	49,25	68,70
3,5	100,28	16,25	101,62	29	83,79	41,75	76,25	49,5	68,57
3,75	100,32	16,5	101,64	29,25	81,63	42	76,12	49,75	68,56
4	100,38	16,75	101,65	29,5	79,85	42,25	76,12	50	68,50
4,25	100,45	17	101,66	29,75	79,10	42,5	76,08	50,25	68,48
4,5	100,50	17,25	101,72	30	78,86	42,75	76,04	50,5	68,43
4,75	100,56	17,5	101,72	30,25	78,72	43	75,97	50,75	68,37
5	100,60	17,75	101,73	30,5	78,59	43,25	75,93	51	68,34
5,25	100,68	18	101,76	30,75	78,48	43,5	75,91	51,25	68,32
5,5	100,74	18,25	101,78	31	78,39	43,75	75,86	51,5	68,31
5,75	100,82	18,5	101,79	31,25	78,28	44	75,83	51,75	68,25
6	100,88	18,75	101,82	31,5	78,19	44,25	75,83	52	68,24
6,25	100,96	19	101,80	31,75	78,14	44,5	75,66	52,25	68,22
6,5	100,98	19,25	101,83	32	78,02	44,75	75,66	52,5	68,18
6,75	100,95	19,5	101,84	32,25	77,98	45	75,66	52,75	68,17
7	100,92	19,75	101,84	32,5	77,98	45,25	75,69	53	68,16
7,25	100,83	20	101,85	32,75	77,86	45,5	75,67	53,25	68,14
7,5	100,72	20,25	101,84	33	77,79	45,75	75,63	53,5	68,12
7,75	100,60	20,5	101,81	33,25	77,72	46	75,62	53,75	68,10
8	100,52	20,75	101,79	33,5	77,68	46,25	75,59	54	68,07
8,25	100,45	21	101,72	33,75	77,63	46,5	75,53	54,25	68,03
8,5	100,30	21,25	101,64	34	77,55	46,75	75,52	54,5	68,00
8,75	100,10	21,5	101,53	34,25	77,51	47	75,48	54,75	67,95
9	100,01	21,75	101,39	34,5	77,44	47,25	74,88	55	67,95
9,25	100,03	22	101,26	34,75	77,40	47,5	75,69	55,25	67,94
9,5	100,05	22,25	101,13	35	77,34	47,75	75,92	55,5	67,94
9,75	100,09	22,5	101,00	35,25	77,29	47,8	76,01	55,75	67,93
10	100,17	22,75	100,88	35,5	77,25	47,85	76,01	56	67,90
10,25	100,22	23	100,72	35,75	77,18	47,9	75,96		
10,5	100,28	23,25	100,44	36	77,16	47,95	75,86		
10,75	100,36	23,5	99,97	36,25	77,09	48	75,69		
11	100,47	23,75	99,51	36,5	77,06	48,05	75,46		
11,25	100,54	24	98,90	36,75	77,01	48,1	75,17		
11,5	100,61	24,25	98,17	37	76,97	48,15	74,82		
11,75	100,69	24,5	97,55	37,25	76,94	48,2	74,42		
12	100,77	24,75	96,80	37,5	76,90	48,25	74,00		
12,25	100,84	25	96,43	37,75	76,88	48,3	73,57		
12,5	100,94	25,25	96,06	38	76,83	48,35	73,15		

τ ,МИН	m ,%	τ ,МИН	m ,%	τ ,МИН	m ,%	τ ,МИН	m ,%
FeS_2 : $T = 600 \text{ }^\circ\text{C}$, $\delta = 100 \text{ мкм}$, $m_0 = 10,6 \text{ мг}$							
0	100,00	12,75	101,16	25,5	95,65	36,65	77,77
0,25	99,99	13	101,21	25,75	95,51	36,7	77,51
0,5	99,99	13,25	101,26	26	95,34	36,75	77,22
0,75	99,97	13,5	101,32	26,25	95,06	36,8	76,91
1	99,98	13,75	101,38	26,5	94,76	36,85	76,59
1,25	99,96	14	101,46	26,75	94,39	36,9	76,28
1,5	100,05	14,25	101,51	27	93,93	36,95	75,98
1,75	100,03	14,5	101,53	27,25	93,37	37	75,69
2	100,05	14,75	101,58	27,5	92,59	37,05	75,39
2,25	100,05	15	101,63	27,75	91,74	37,1	75,09
2,5	100,11	15,25	101,66	28	90,72	37,15	74,79
2,75	100,14	15,5	101,70	28,25	89,53	37,2	74,50
3	100,16	15,75	101,74	28,5	88,08	37,25	74,21
3,25	100,22	16	101,76	28,75	86,46	37,3	73,93
3,5	100,28	16,25	101,80	29	84,49	37,35	73,66
3,75	100,32	16,5	101,84	29,25	82,62	37,4	73,38
4	100,40	16,75	101,82	29,5	81,09	37,45	73,12
4,25	100,45	17	101,84	29,75	79,97	37,5	72,87
4,5	100,51	17,25	101,88	30	79,57	37,55	72,63
4,75	100,57	17,5	101,91	30,25	79,41	37,6	72,39
5	100,67	17,75	101,92	30,5	79,27	37,65	72,16
5,25	100,71	18	101,93	30,75	79,20	37,7	71,94
5,5	100,82	18,25	101,98	31	79,11	37,75	71,74
5,75	100,89	18,5	101,99	31,25	79,01	37,8	71,57
6	100,93	18,75	101,97	31,5	78,94	37,85	71,41
6,25	100,99	19	102,03	31,75	78,89	37,9	71,29
6,5	101,02	19,25	102,03	32	78,86	37,95	71,19
6,75	101,02	19,5	102,05	32,25	78,81	38	71,12
7	100,98	19,75	102,02	32,5	78,71	38,25	71,04
7,25	100,90	20	102,02	32,75	78,65	38,5	71,00
7,5	100,76	20,25	102,03	33	78,61	38,75	70,98
7,75	100,63	20,5	101,97	33,25	78,60	39	70,94
8	100,52	20,75	101,93	33,5	78,55	39,25	70,92
8,25	100,42	21	101,87	33,75	78,47	39,5	70,91
8,5	100,33	21,25	101,83	34	78,42	39,75	70,87
8,75	100,05	21,5	101,75	34,25	78,39		
9	99,94	21,75	101,59	34,5	78,39		
9,25	99,96	22	101,47	34,75	78,33		
9,5	100,04	22,25	101,34	35	78,26		
9,75	100,09	22,5	101,21	35,25	78,23		
10	100,20	22,75	101,08	35,5	78,23		
10,25	100,28	23	100,92	35,75	77,31		
10,5	100,38	23,25	100,66	36	78,29		
10,75	100,50	23,5	100,14	36,25	78,46		
11	100,58	23,75	99,69	36,3	78,49		
11,25	100,70	24	98,92	36,35	78,49		
11,5	100,78	24,25	98,25	36,4	78,48		
11,75	100,87	24,5	97,58	36,45	78,43		
12	100,94	24,75	96,87	36,5	78,34		
12,25	101,03	25	96,35	36,55	78,19		
12,5	101,09	25,25	95,93	36,6	78,00		

τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %
FeS ₂ : $T = 450$ °C, $\delta = 100$ МКМ, $m_0 = 10,4$ МГ											
0	100,00	12,75	101,56	25,5	101,15	37,25	97,08	39,55	87,91	50,5	84,00
0,25	100,00	13	101,62	25,75	101,07	37,3	96,94	39,6	87,82	50,75	83,96
0,5	100,00	13,25	101,69	26	101,01	37,35	96,71	39,65	87,72	51	83,91
0,75	100,00	13,5	101,75	26,25	100,90	37,4	96,50	39,7	87,63	51,25	83,88
1	100,00	13,75	101,80	26,5	100,82	37,45	96,25	39,75	87,57	51,5	83,85
1,25	100,03	14	101,87	26,75	100,70	37,5	96,02	39,8	87,51	51,75	83,82
1,5	100,04	14,25	101,92	27	100,61	37,55	95,74	39,85	87,43	52	83,77
1,75	100,06	14,5	101,95	27,25	100,51	37,6	95,51	39,9	87,36	52,25	83,73
2	100,09	14,75	102,00	27,5	100,42	37,65	95,21	39,95	87,30	52,5	83,70
2,25	100,13	15	102,05	27,75	100,34	37,7	94,94	40	87,24	52,75	83,65
2,5	100,17	15,25	102,09	28	100,26	37,75	94,61	40,25	86,97	53	83,62
2,75	100,23	15,5	102,13	28,25	100,17	37,8	94,32	40,5	86,73	53,25	83,56
3	100,30	15,75	102,13	28,5	100,09	37,85	94,07	40,75	86,55	53,5	83,52
3,25	100,36	16	102,16	28,75	99,99	37,9	93,83	41	86,38	53,75	83,48
3,5	100,40	16,25	102,18	29	99,90	37,95	93,54	41,25	86,25	54	83,46
3,75	100,46	16,5	102,20	29,25	99,81	38	93,26	41,5	86,12	54,25	83,41
4	100,55	16,75	102,23	29,5	99,71	38,05	93,03	41,75	86,03	54,5	83,36
4,25	100,63	17	102,25	29,75	99,62	38,1	92,84	42	85,91	54,75	83,34
4,5	100,70	17,25	102,26	30	99,55	38,15	92,58	42,25	85,83	55	83,30
4,75	100,79	17,5	102,29	30,25	99,49	38,2	92,36	42,5	85,74	55,25	83,26
5	100,88	17,75	102,33	30,5	99,40	38,25	92,10	42,75	85,64	55,5	83,22
5,25	100,95	18	102,35	30,75	99,33	38,3	91,88	43	85,56	55,75	83,19
5,5	101,04	18,25	102,35	31	99,27	38,35	91,65	43,25	85,51	56	83,15
5,75	101,13	18,5	102,38	31,25	99,20	38,4	91,45	43,5	85,43	56,25	83,12
6	101,19	18,75	102,38	31,5	99,14	38,45	91,21	43,75	85,39	56,5	83,12
6,25	101,26	19	102,38	31,75	99,06	38,5	91,00	44	85,33	56,75	83,09
6,5	101,28	19,25	102,38	32	98,98	38,55	90,78	44,25	85,28	57	83,04
6,75	101,28	19,5	102,38	32,25	98,92	38,6	90,55	44,5	85,22	57,25	83,02
7	101,21	19,75	102,39	32,5	98,86	38,65	90,35	44,75	85,16	57,5	82,98
7,25	101,13	20	102,39	32,75	98,80	38,7	90,16	45	85,11	57,75	82,96
7,5	101,02	20,25	102,38	33	98,71	38,75	89,99	45,25	85,06	58	82,92
7,75	100,93	20,5	102,38	33,25	98,67	38,8	89,84	45,5	85,01	58,25	82,89
8	100,87	20,75	102,34	33,5	98,61	38,85	89,67	45,75	84,94	58,5	82,87
8,25	100,79	21	102,28	33,75	98,55	38,9	89,50	46	84,89	58,75	82,85
8,5	100,57	21,25	102,21	34	98,49	38,95	89,34	46,25	84,83	59	82,81
8,75	100,43	21,5	102,11	34,25	98,45	39	89,21	46,5	84,79	59,25	82,79
9	100,41	21,75	102,00	34,5	98,39	39,05	89,08	46,75	84,72	59,5	82,77
9,25	100,45	22	101,90	34,75	98,34	39,1	88,97	47	84,68	59,75	82,75
9,5	100,49	22,25	101,85	35	98,28	39,15	88,83	47,25	84,62	60	82,71
9,75	100,55	22,5	101,77	35,25	98,24	39,2	88,71	47,5	84,58	60,25	82,71
10	100,61	22,75	101,72	35,5	98,17	39,25	88,58	47,75	84,52	60,5	82,69
10,25	100,68	23	101,65	35,75	98,10	39,3	88,48	48	84,46	60,75	82,65
10,5	100,77	23,25	101,63	36	98,08	39,35	88,36	48,25	84,42	61	82,64
10,75	100,87	23,5	101,59	36,25	97,31	39,4	88,24	48,5	84,37	61,25	82,62
11	100,98	23,75	101,57	36,5	98,25	39,45	88,10	48,75	84,32	61,5	82,62
11,25	101,07	24	101,53	36,75	98,26	39,5	88,00	49	84,28	61,75	82,58
11,5	101,17	24,25	101,48	37	97,96	39,55	87,91	49,25	84,23	62	82,56
11,75	101,25	24,5	101,42	37,05	97,82	39,6	87,82	49,5	84,20	62,25	82,53
12	101,34	24,75	101,37	37,1	97,68	39,65	87,72	49,75	84,14	62,5	82,51
12,25	101,42	25	101,29	37,15	97,48	39,7	87,63	50	84,10	62,75	82,50
12,5	101,50	25,25	101,22	37,2	97,25	39,75	87,57	50,25	84,05	63	82,50

τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %
FeS_2 : $T = 900^\circ\text{C}$, $\delta = 300$ МКМ, $m_0 = 10,5$ МГ									
0	100,00	12,75	92,83	25,5	74,46	38,25	64,70	49	61,30
0,25	100,01	13	92,77	25,75	73,62	38,5	64,67	49,05	60,89
0,5	100,01	13,25	92,70	26	72,99	38,75	64,61	49,1	60,50
0,75	99,99	13,5	92,62	26,25	72,44	39	64,58	49,15	60,15
1	99,99	13,75	92,58	26,5	71,91	39,25	64,52	49,2	59,83
1,25	100,00	14	92,55	26,75	71,40	39,5	64,50	49,25	59,55
1,5	100,01	14,25	92,53	27	70,69	39,75	64,47	49,3	59,32
1,75	100,06	14,5	92,52	27,25	70,06	40	64,43	49,35	59,13
2	100,08	14,75	92,51	27,5	69,32	40,25	64,38	49,4	58,99
2,25	100,10	15	92,50	27,75	68,55	40,5	64,34	49,45	58,89
2,5	100,15	15,25	92,52	28	68,06	40,75	64,30	49,5	58,81
2,75	100,18	15,5	92,54	28,25	67,61	41	64,26	49,75	58,65
3	100,20	15,75	92,55	28,5	67,19	41,25	64,20	50	58,59
3,25	100,27	16	92,55	28,75	66,83	41,5	64,18	50,25	58,52
3,5	100,31	16,25	92,54	29	66,54	41,75	64,14	50,5	58,48
3,75	100,37	16,5	92,56	29,25	66,26	42	64,10	50,75	58,44
4	100,41	16,75	92,56	29,5	66,08	42,25	64,06	51	58,39
4,25	100,46	17	92,58	29,75	65,93	42,5	64,01	51,25	58,37
4,5	100,50	17,25	92,58	30	65,88	42,75	63,98	51,5	58,34
4,75	100,57	17,5	92,59	30,25	65,82	43	63,89	51,75	58,32
5	100,64	17,75	92,63	30,5	65,74	43,25	63,89		
5,25	100,70	18	92,63	30,75	65,72	43,5	63,82		
5,5	100,77	18,25	92,63	31	65,66	43,75	63,80		
5,75	100,84	18,5	92,63	31,25	65,63	44	63,73		
6	100,90	18,75	92,60	31,5	65,59	44,25	63,70		
6,25	100,90	19	92,56	31,75	65,51	44,5	63,68		
6,5	100,90	19,25	92,53	32	65,48	44,75	63,64		
6,75	100,77	19,5	92,55	32,25	65,44	45	63,61		
7	100,35	19,75	92,51	32,5	65,40	45,25	63,59		
7,25	99,31	20	92,47	32,75	65,35	45,5	63,57		
7,5	98,33	20,25	92,45	33	65,29	45,75	63,55		
7,75	97,52	20,5	92,42	33,25	65,27	46	63,53		
8	96,93	20,75	92,35	33,5	65,27	46,25	63,50		
8,25	96,39	21	92,28	33,75	65,22	46,5	63,49		
8,5	95,40	21,25	92,14	34	65,21	46,75	63,43		
8,75	94,87	21,5	92,02	34,25	65,18	47	63,39		
9	94,47	21,75	91,84	34,5	65,10	47,25	63,37		
9,25	94,17	22	91,60	34,75	65,08	47,5	63,34		
9,5	93,88	22,25	91,27	35	65,03	47,75	63,31		
9,75	93,69	22,5	90,88	35,25	65,02	48	62,01		
10	93,58	22,75	90,32	35,5	65,00	48,25	64,36		
10,25	93,48	23	89,61	35,75	64,99	48,5	64,40		
10,5	93,39	23,25	88,76	36	64,95	48,55	64,28		
10,75	93,32	23,5	87,92	36,25	64,91	48,6	64,15		
11	93,28	23,75	86,88	36,5	64,90	48,65	63,96		
11,25	93,24	24	85,30	36,75	64,88	48,7	63,71		
11,5	93,17	24,25	83,32	37	64,85	48,75	63,40		
11,75	93,12	24,5	81,26	37,25	64,83	48,8	63,03		
12	93,07	24,75	79,27	37,5	64,80	48,85	62,63		
12,25	93,01	25	77,39	37,75	64,76	48,9	62,18		
12,5	92,90	25,25	75,70	38	64,72	48,95	61,73		

τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %
FeS ₂ : $T = 800$ °C, $\delta = 300$ МКМ, $m_0 = 10,5$ МГ									
0	100,00	12,75	93,09	25,5	75,36	38,25	66,40	47	60,48
0,25	100,00	13	93,00	25,75	74,49	38,5	66,38	47,25	60,42
0,5	100,00	13,25	92,95	26	73,88	38,75	66,35	47,5	60,40
0,75	99,99	13,5	92,90	26,25	73,36	39	66,33	47,75	60,37
1	100,01	13,75	92,86	26,5	72,77	39,25	66,33	48	60,34
1,25	100,01	14	92,84	26,75	72,17	39,5	66,33	48,25	60,33
1,5	100,01	14,25	92,84	27	71,54	39,75	66,33		
1,75	100,03	14,5	92,84	27,25	70,90	40	66,33		
2	100,06	14,75	92,84	27,5	70,18	40,25	66,34		
2,25	100,09	15	92,85	27,75	69,58	40,5	66,33		
2,5	100,11	15,25	92,87	28	69,24	40,75	66,33		
2,75	100,14	15,5	92,88	28,25	68,77	41	66,33		
3	100,20	15,75	92,90	28,5	68,32	41,25	66,33		
3,25	100,25	16	92,91	28,75	67,99	41,5	66,31		
3,5	100,32	16,25	92,95	29	67,72	41,75	66,30		
3,75	100,39	16,5	92,97	29,25	67,51	42	66,27		
4	100,43	16,75	93,00	29,5	67,37	42,25	66,22		
4,25	100,50	17	93,00	29,75	67,29	42,5	65,34		
4,5	100,58	17,25	93,01	30	67,20	42,75	66,53		
4,75	100,63	17,5	93,05	30,25	67,16	43	66,70		
5	100,69	17,75	93,05	30,5	67,12	43,05	66,44		
5,25	100,75	18	93,07	30,75	67,10	43,1	66,28		
5,5	100,84	18,25	93,09	31	67,09	43,15	66,05		
5,75	100,91	18,5	93,09	31,25	67,04	43,2	65,78		
6	100,99	18,75	93,09	31,5	67,01	43,25	65,45		
6,25	101,01	19	93,09	31,75	66,97	43,3	65,08		
6,5	100,99	19,25	93,08	32	66,95	43,35	64,69		
6,75	100,88	19,5	93,08	32,25	66,92	43,4	64,29		
7	100,50	19,75	93,04	32,5	66,90	43,45	63,92		
7,25	99,43	20	93,02	32,75	66,91	43,5	63,56		
7,5	98,44	20,25	93,00	33	66,86	43,55	63,21		
7,75	97,65	20,5	92,96	33,25	66,85	43,6	62,88		
8	97,03	20,75	92,92	33,5	66,83	43,65	62,59		
8,25	96,42	21	92,85	33,75	66,81	43,7	62,33		
8,5	95,53	21,25	92,74	34	66,79	43,75	62,10		
8,75	94,91	21,5	92,65	34,25	66,75	43,8	61,91		
9	94,56	21,75	92,45	34,5	66,72	43,85	61,76		
9,25	94,28	22	92,24	34,75	66,70	43,9	61,65		
9,5	94,01	22,25	91,94	35	66,68	43,95	61,56		
9,75	93,85	22,5	91,53	35,25	66,66	44	61,51		
10	93,70	22,75	91,06	35,5	66,62	44,25	61,40		
10,25	93,58	23	90,43	35,75	66,62	44,5	61,29		
10,5	93,49	23,25	89,57	36	66,60	44,75	61,16		
10,75	93,43	23,5	88,67	36,25	66,58	45	61,07		
11	93,38	23,75	87,66	36,5	66,56	45,25	60,97		
11,25	93,36	24	86,23	36,75	66,52	45,5	60,88		
11,5	93,32	24,25	84,34	37	66,52	45,75	60,80		
11,75	93,29	24,5	82,23	37,25	66,50	46	60,70		
12	93,24	24,75	80,25	37,5	66,50	46,25	60,64		
12,25	93,20	25	78,37	37,75	66,46	46,5	60,54		
12,5	93,13	25,25	76,65	38	66,44	46,75	60,52		

τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %
Шихта: $T = 900$ °С, $\delta = 100$ мкм, $m_0 = 10,3$ мг									
0	100,00	12,75	99,91	25,5	98,24	38,25	95,53	49,8	91,81
0,25	99,99	13	99,94	25,75	98,15	38,5	95,47	49,85	91,35
0,5	99,97	13,25	99,94	26	98,08	38,75	95,37	49,9	90,87
0,75	99,96	13,5	99,90	26,25	97,99	39	95,31	49,95	90,37
1	99,96	13,75	99,88	26,5	97,93	39,25	95,23	50	89,87
1,25	99,94	14	99,88	26,75	97,85	39,5	95,15	50,05	89,37
1,5	99,94	14,25	99,91	27	97,76	39,75	95,05	50,1	88,85
1,75	99,96	14,5	99,94	27,25	97,72	40	94,95	50,15	88,33
2	99,98	14,75	99,98	27,5	97,67	40,25	94,87	50,2	87,82
2,25	100,00	15	100,04	27,75	97,59	40,5	94,80	50,25	87,32
2,5	100,02	15,25	100,05	28	97,50	40,75	94,68	50,3	86,83
2,75	100,05	15,5	100,10	28,25	97,46	41	94,57	50,35	86,36
3	100,09	15,75	100,11	28,5	97,37	41,25	94,45	50,4	85,92
3,25	100,12	16	100,15	28,75	97,32	41,5	94,34	50,45	85,51
3,5	100,14	16,25	100,19	29	97,23	41,75	94,20	50,5	85,14
3,75	100,16	16,5	100,22	29,25	97,15	42	94,16	50,55	84,82
4	100,16	16,75	100,25	29,5	97,08	42,25	94,04	50,6	84,53
4,25	100,12	17	100,26	29,75	97,04	42,5	93,97	50,65	84,30
4,5	99,97	17,25	100,28	30	96,97	42,75	93,88	50,7	84,11
4,75	99,79	17,5	100,32	30,25	96,90	43	93,81	50,75	83,78
5	99,59	17,75	100,34	30,5	96,80	43,25	93,72	51	83,56
5,25	99,46	18	100,36	30,75	96,71	43,5	93,65	51,25	83,50
5,5	99,41	18,25	100,41	31	96,64	43,75	93,57	51,5	83,44
5,75	99,39	18,5	100,43	31,25	96,57	44	93,48	51,75	83,38
6	99,37	18,75	100,45	31,5	96,50	44,25	93,40	52	83,34
6,25	99,41	19	100,45	31,75	96,49	44,5	93,35	52,25	83,30
6,5	99,47	19,25	100,47	32	96,43	44,75	93,27	52,5	83,26
6,75	99,49	19,5	100,49	32,25	96,38	45	93,22	52,75	83,24
7	99,54	19,75	100,48	32,5	96,34	45,25	93,17	53	83,22
7,25	99,62	20	100,50	32,75	96,32	45,5	93,13	53,25	83,20
7,5	99,68	20,25	100,50	33	96,26	45,75	93,11	53,5	83,17
7,75	99,70	20,5	100,48	33,25	96,23	46	93,06	53,75	83,14
8	99,65	20,75	100,46	33,5	96,19	46,25	93,02	54	83,10
8,25	99,53	21	100,45	33,75	96,17	46,5	92,97	54,25	83,08
8,5	99,47	21,25	100,42	34	96,16	46,75	92,93	54,5	83,06
8,75	99,47	21,5	100,40	34,25	96,12	47	92,90	54,75	83,01
9	99,52	21,75	100,38	34,5	96,09	47,25	92,88	55	83,00
9,25	99,58	22	100,34	34,75	96,06	47,5	92,83	55,25	82,98
9,5	99,64	22,25	100,30	35	96,02	47,75	92,76	55,5	82,95
9,75	99,70	22,5	100,26	35,25	96,02	48	92,72	55,75	82,93
10	99,75	22,75	100,20	35,5	95,98	48,25	92,70	56	82,91
10,25	99,80	23	100,13	35,75	95,98	48,5	92,63	56,25	82,89
10,5	99,80	23,25	100,00	36	95,94	48,75	92,60	56,5	82,87
10,75	99,80	23,5	99,86	36,25	95,89	49	91,24	56,75	82,85
11	99,80	23,75	99,67	36,5	95,83	49,25	93,48	57	82,83
11,25	99,80	24	99,44	36,75	95,80	49,5	93,39	57,25	82,83
11,5	99,80	24,25	99,15	37	95,76	49,55	93,28	57,5	82,81
11,75	99,82	24,5	98,91	37,25	95,73	49,6	93,10	57,75	82,79
12	99,83	24,75	98,68	37,5	95,71	49,65	92,86	58	82,77
12,25	99,88	25	98,50	37,75	95,62	49,7	92,57		
12,5	99,90	25,25	98,35	38	95,58	49,75	92,22		

τ ,МИН	m ,%	τ ,МИН	m ,%	τ ,МИН	m ,%	τ ,МИН	m ,%	τ ,МИН	m ,%
Шихта: $T = 800$ °С, $\delta = 100$ мкм, $m_0 = 10,5$ мг									
0	100,00	12,75	99,37	25,5	97,42	38,25	94,59	46	86,72
0,25	99,96	13	99,35	25,75	97,32	38,5	94,51	46,25	86,32
0,5	99,94	13,25	99,30	26	97,24	38,75	94,46	46,5	85,54
0,75	99,92	13,5	99,28	26,25	97,17	39	94,40	46,75	84,87
1	99,92	13,75	99,27	26,5	97,10	39,25	94,33	47	84,54
1,25	99,93	14	99,27	26,75	97,02	39,5	94,26	47,25	84,43
1,5	99,93	14,25	99,29	27	96,95	39,75	94,23	47,5	84,31
1,75	99,95	14,5	99,32	27,25	96,89	40	94,19	47,75	84,23
2	99,96	14,75	99,35	27,5	96,80	40,25	94,15	48	84,15
2,25	99,96	15	99,37	27,75	96,73	40,5	94,11	48,25	84,09
2,5	99,99	15,25	99,42	28	96,68	40,75	94,08	48,5	84,04
2,75	100,02	15,5	99,44	28,25	96,59	41	94,04	48,75	83,98
3	100,04	15,75	99,46	28,5	96,50	41,25	93,99	49	83,95
3,25	100,08	16	99,48	28,75	96,41	41,5	93,95	49,25	83,92
3,5	100,10	16,25	99,50	29	96,34	41,75	93,91	49,5	83,88
3,75	100,10	16,5	99,54	29,25	96,28	42	93,88	49,75	83,87
4	100,09	16,75	99,57	29,5	96,20	42,25	93,82	50	83,80
4,25	100,02	17	99,58	29,75	96,13	42,5	93,78	50,25	83,76
4,5	99,88	17,25	99,60	30	96,08	42,75	93,73	50,5	83,74
4,75	99,66	17,5	99,62	30,25	95,99	43	93,70	50,75	83,72
5	99,34	17,75	99,64	30,5	95,92	43,25	93,66	51	83,70
5,25	99,07	18	99,67	30,75	95,87	43,5	93,64	51,25	83,67
5,5	98,95	18,25	99,69	31	95,79	43,75	93,58	51,5	83,64
5,75	98,89	18,5	99,72	31,25	95,73	44	92,36	51,75	83,61
6	98,89	18,75	99,74	31,5	95,69	44,25	92,52	52	83,60
6,25	98,89	19	99,75	31,75	95,63	44,5	94,35	52,25	83,58
6,5	98,92	19,25	99,76	32	95,57	44,75	94,50	52,5	83,56
6,75	98,98	19,5	99,76	32,25	95,53	44,8	94,36	52,75	83,54
7	99,03	19,75	99,78	32,5	95,48	44,85	94,23	53	83,50
7,25	99,10	20	99,78	32,75	95,43	44,9	94,04	53,25	83,49
7,5	99,15	20,25	99,76	33	95,40	44,95	93,78	53,5	83,46
7,75	99,16	20,5	99,76	33,25	95,36	45	93,46	53,75	83,44
8	99,10	20,75	99,74	33,5	95,30	45,05	93,09	54	83,41
8,25	98,99	21	99,74	33,75	95,26	45,1	92,67	54,25	83,40
8,5	98,95	21,25	99,70	34	95,24	45,15	92,22	54,5	83,38
8,75	98,99	21,5	99,69	34,25	95,18	45,	91,75	54,75	83,34
9	99,05	21,75	99,65	34,5	95,15	45,25	91,29	55	83,32
9,25	99,12	22	99,60	34,75	95,11	45,3	90,84	55,25	83,30
9,5	99,18	22,25	99,56	35	95,09	45,35	90,40	55,5	83,28
9,75	99,22	22,5	99,52	35,25	95,07	45,4	89,97	55,75	83,27
10	99,28	22,75	99,47	35,5	95,03	45,45	89,54	56	83,25
10,25	99,30	23	99,38	35,75	95,01	45,5	89,13	56,25	83,23
10,5	99,33	23,25	99,27	36	94,97	45,55	88,75	56,5	83,23
10,75	99,32	23,5	99,14	36,25	94,94	45,6	88,39	56,75	83,21
11	99,31	23,75	98,95	36,5	94,90	45,65	88,06	57	83,19
11,25	99,31	24	98,73	36,75	94,86	45,7	87,77	57,25	83,19
11,5	99,30	24,25	98,44	37	94,81	45,75	87,51	57,5	83,17
11,75	99,32	24,5	98,17	37,25	94,78	45,8	87,29	57,75	83,15
12	99,34	24,75	97,89	37,5	94,72	45,85	87,11	58	83,12
12,25	99,36	25	97,70	37,75	94,69	45,9	86,96	58,25	83,11
12,5	99,37	25,25	97,53	38	94,63	45,95	86,83	58,5	83,10

τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %
Шихта: $T = 700$ °С, $\delta = 100$ мкм, $m_0 = 10,5$ мг									
0	100,00	12,75	99,33	25,5	97,43	38,25	94,89	51	89,96
0,25	99,98	13	99,30	25,75	97,32	38,5	94,87	51,25	89,90
0,5	99,98	13,25	99,27	26	97,25	38,75	94,85	51,5	89,87
0,75	99,96	13,5	99,25	26,25	97,15	39	94,83	51,75	89,84
1	99,95	13,75	99,24	26,5	97,10	39,25	94,81	52	89,81
1,25	99,93	14	99,26	26,75	97,02	39,5	94,77	52,25	89,77
1,5	99,95	14,25	99,26	27	96,91	39,75	94,74	52,5	89,73
1,75	100,01	14,5	99,28	27,25	96,85	40	94,71	52,75	89,69
2	100,03	14,75	99,32	27,5	96,76	40,25	94,70	53	89,66
2,25	100,03	15	99,36	27,75	96,69	40,5	94,65	53,25	89,62
2,5	100,01	15,25	99,39	28	96,61	40,75	94,35	53,5	89,58
2,75	100,03	15,5	99,41	28,25	96,53	41	94,80	53,75	89,55
3	100,05	15,75	99,46	28,5	96,47	41,25	95,42	54	89,50
3,25	100,05	16	99,49	28,75	96,38	41,5	95,46	54,25	89,47
3,5	100,09	16,25	99,50	29	96,29	41,75	94,57	54,5	89,41
3,75	100,09	16,5	99,54	29,25	96,22	42	93,45	54,75	89,38
4	100,06	16,75	99,56	29,5	96,13	42,25	92,55	55	89,34
4,25	99,97	17	99,60	29,75	96,05	42,5	91,90	55,25	89,30
4,5	99,82	17,25	99,60	30	95,97	42,75	91,47	55,5	89,26
4,75	99,61	17,5	99,63	30,25	95,89	43	91,21	55,75	89,22
5	99,30	17,75	99,65	30,5	95,83	43,25	91,04	56	89,19
5,25	99,07	18	99,65	30,75	95,76	43,5	90,94	56,25	89,14
5,5	98,96	18,25	99,66	31	95,68	43,75	90,90	56,5	89,10
5,75	98,91	18,5	99,67	31,25	95,63	44	90,88	56,75	89,08
6	98,90	18,75	99,70	31,5	95,56	44,25	90,88	57	89,04
6,25	98,90	19	99,70	31,75	95,51	44,5	90,88	57,25	89,00
6,5	98,94	19,25	99,70	32	95,47	44,75	90,86	57,5	88,94
6,75	98,96	19,5	99,71	32,25	95,41	45	90,84	57,75	88,92
7	99,00	19,75	99,71	32,5	95,38	45,25	90,83		
7,25	99,07	20	99,73	32,75	95,33	45,5	90,81		
7,5	99,13	20,25	99,72	33	95,30	45,75	90,79		
7,75	99,13	20,5	99,72	33,25	95,25	46	90,75		
8	99,04	20,75	99,70	33,5	95,21	46,25	90,72		
8,25	98,93	21	99,68	33,75	95,15	46,5	90,69		
8,5	98,87	21,25	99,68	34	95,13	46,75	90,65		
8,75	98,87	21,5	99,66	34,25	95,11	47	90,63		
9	98,96	21,75	99,62	34,5	95,09	47,25	90,58		
9,25	99,01	22	99,58	34,75	95,08	47,5	90,54		
9,5	99,08	22,25	99,55	35	95,08	47,75	90,50		
9,75	99,11	22,5	99,51	35,25	95,07	48	90,47		
10	99,18	22,75	99,47	35,5	95,06	48,25	90,44		
10,25	99,22	23	99,41	35,75	95,05	48,5	90,39		
10,5	99,24	23,25	99,32	36	95,04	48,75	90,34		
10,75	99,24	23,5	99,20	36,25	95,04	49	90,31		
11	99,23	23,75	99,04	36,5	95,03	49,25	90,28		
11,25	99,25	24	98,81	36,75	95,00	49,5	90,22		
11,5	99,27	24,25	98,55	37	94,98	49,75	90,17		
11,75	99,29	24,5	98,26	37,25	94,96	50	90,11		
12	99,31	24,75	97,99	37,5	94,94	50,25	90,10		
12,25	99,33	25	97,74	37,75	94,94	50,5	90,04		
12,5	99,33	25,25	97,56	38	94,91	50,75	90,00		

τ ,МИН	m ,%	τ ,МИН	m ,%	τ ,МИН	m ,%	τ ,МИН	m ,%	τ ,МИН	m ,%
Шихта: $T = 950$ °С, $\delta = 300$ мкм, $m_0 = 10,3$ мг									
0	100,00	12,75	101,54	25,5	98,16	38,25	93,55	50,4	89,62
0,25	100,02	13	101,49	25,75	98,11	38,5	93,48	50,45	89,33
0,5	100,05	13,25	101,38	26	98,02	38,75	93,33	50,5	88,99
0,75	100,05	13,5	101,31	26,25	97,91	39	93,29	50,55	88,59
1	100,07	13,75	101,24	26,5	97,80	39,25	93,16	50,6	88,15
1,25	100,11	14	101,25	26,75	97,73	39,5	93,13	50,65	87,68
1,5	100,15	14,25	101,29	27	97,62	39,75	93,04	50,7	87,19
1,75	100,17	14,5	101,30	27,25	97,51	40	92,85	50,75	86,69
2	100,18	14,75	101,35	27,5	97,43	40,25	92,75	50,8	86,20
2,25	100,22	15	101,38	27,75	97,31	40,5	92,68	50,85	85,73
2,5	100,28	15,25	101,40	28	97,18	40,75	92,58	50,9	85,27
2,75	100,32	15,5	101,42	28,25	97,15	41	92,51	50,95	84,80
3	100,39	15,75	101,44	28,5	97,07	41,25	92,40	51	84,34
3,25	100,42	16	101,46	28,75	96,92	41,5	92,28	51,05	83,90
3,5	100,50	16,25	101,47	29	96,77	41,75	92,19	51,1	83,52
3,75	100,56	16,5	101,49	29,25	96,68	42	92,18	51,15	83,17
4	100,60	16,75	101,49	29,5	96,68	42,25	91,95	51,2	82,86
4,25	100,63	17	101,51	29,75	96,32	42,5	92,00	51,25	82,61
4,5	100,68	17,25	101,58	30	96,30	42,75	91,88	51,3	82,38
4,75	100,75	17,5	101,62	30,25	96,20	43	91,77	51,35	82,21
5	100,81	17,75	101,64	30,5	96,02	43,25	91,74	51,4	82,10
5,25	100,86	18	101,62	30,75	95,84	43,5	91,66	51,45	82,02
5,5	100,91	18,25	101,62	31	95,67	43,75	91,42	51,5	81,95
5,75	100,97	18,5	101,65	31,25	95,59	44	91,37	51,75	81,75
6	101,07	18,75	101,66	31,5	95,45	44,25	91,36	52	81,71
6,25	101,15	19	101,64	31,75	95,26	44,5	91,26	52,25	81,71
6,5	101,20	19,25	101,60	32	95,24	44,75	91,15	52,5	81,63
6,75	101,27	19,5	101,60	32,25	95,13	45	91,03	52,75	81,54
7	101,25	19,75	101,58	32,5	95,08	45,25	90,97	53	81,46
7,25	101,09	20	101,61	32,75	94,98	45,5	90,93	53,25	81,50
7,5	100,86	20,25	101,59	33	94,93	45,75	90,84	53,5	81,40
7,75	100,83	20,5	101,50	33,25	94,84	46	90,78	53,75	81,34
8	100,89	20,75	101,46	33,5	94,82	46,25	90,73	54	81,39
8,25	100,92	21	101,45	33,75	94,77	46,5	90,69	54,25	81,27
8,5	101,00	21,25	101,36	34	94,71	46,75	90,61	54,5	81,32
8,75	101,02	21,5	101,25	34,25	94,65	47	90,55	54,75	81,21
9	101,19	21,75	101,17	34,5	94,54	47,25	90,44	55	81,20
9,25	101,21	22	101,06	34,75	94,56	47,5	90,48	55,25	81,27
9,5	101,27	22,25	100,99	35	94,52	47,75	90,38	55,5	81,21
9,75	101,33	22,5	100,88	35,25	94,44	48	90,34	55,75	81,14
10	101,37	22,75	100,74	35,5	94,38	48,25	90,29	56	81,02
10,25	101,42	23	100,56	35,75	94,38	48,5	90,29	56,25	80,93
10,5	101,47	23,25	100,38	36	94,22	48,75	90,21	56,5	80,98
10,75	101,54	23,5	100,04	36,25	94,20	49	90,16	56,75	81,04
11	101,61	23,75	99,61	36,5	94,14	49,25	90,12	57	80,85
11,25	101,59	24	99,35	36,75	94,02	49,5	90,09		
11,5	101,58	24,25	99,05	37	93,91	49,75	87,95		
11,75	101,65	24,5	98,65	37,25	93,98	50	90,30		
12	101,62	24,75	98,51	37,5	93,82	50,25	90,23		
12,25	101,61	25	98,36	37,75	93,68	50,3	90,02		
12,5	101,57	25,25	98,29	38	93,64	50,35	89,84		

τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %
Шихта: $T = 900$ °C, $\delta = 300$ мкм, $m_0 = 10,4$ мг									
0	100,00	12,75	97,33	25,5	93,82	38,25	88,64	49,4	83,97
0,25	99,97	13	97,24	25,75	93,71	38,5	88,59	49,45	83,49
0,5	99,94	13,25	97,12	26	93,62	38,75	88,50	49,5	83,01
0,75	99,91	13,5	97,06	26,25	93,52	39	88,40	49,55	82,54
1	99,91	13,75	97,01	26,5	93,42	39,25	88,35	49,6	82,08
1,25	99,91	14	97,01	26,75	93,35	39,5	88,26	49,65	81,64
1,5	99,91	14,25	96,88	27	93,25	39,75	88,16	49,7	81,22
1,75	99,91	14,5	96,11	27,25	93,15	40	88,07	49,75	80,83
2	99,93	14,75	96,11	27,5	93,05	40,25	87,98	49,8	80,48
2,25	99,95	15	96,13	27,75	92,91	40,5	87,88	49,85	80,17
2,5	99,97	15,25	96,13	28	92,78	40,75	87,79	49,9	79,91
2,75	99,99	15,5	96,16	28,25	92,68	41	87,68	49,95	79,70
3	100,01	15,75	96,20	28,5	92,58	41,25	87,56	50	79,53
3,25	100,04	16	96,22	28,75	92,48	41,5	87,45	50,25	79,16
3,5	100,06	16,25	96,26	29	92,37	41,75	87,35	50,5	79,06
3,75	100,06	16,5	96,28	29,25	92,25	42	87,24	50,75	78,97
4	100,02	16,75	96,22	29,5	92,13	42,25	87,14	51	78,88
4,25	99,97	17	96,21	29,75	91,99	42,5	87,05	51,25	78,81
4,5	99,80	17,25	96,20	30	91,87	42,75	86,95	51,5	78,77
4,75	99,45	17,5	96,22	30,25	91,73	43	86,87	51,75	78,72
5	98,71	17,75	96,22	30,5	91,59	43,25	86,75	52	78,66
5,25	97,99	18	96,24	30,75	91,42	43,5	86,64	52,25	78,65
5,5	97,48	18,25	96,26	31	91,28	43,75	86,55	52,5	78,63
5,75	97,32	18,5	96,29	31,25	91,13	44	86,41	52,75	78,60
6	97,25	18,75	96,29	31,5	91,00	44,25	86,31	53	78,55
6,25	97,23	19	96,29	31,75	90,83	44,5	86,22	53,25	78,55
6,5	97,23	19,25	96,31	32	90,67	44,75	86,16	53,5	78,54
6,75	97,23	19,5	96,31	32,25	90,53	45	86,13	53,75	78,50
7	97,24	19,75	96,31	32,5	90,40	45,25	86,08	54	78,50
7,25	97,30	20	96,31	32,75	90,27	45,5	86,02	54,25	78,46
7,5	97,36	20,25	96,31	33	90,13	45,75	85,98	54,5	78,45
7,75	97,38	20,5	96,31	33,25	90,02	46	85,92	54,75	78,44
8	97,29	20,75	96,29	33,5	89,93	46,25	85,87	55	78,41
8,25	97,11	21	96,27	33,75	89,81	46,5	85,83		
8,5	97,02	21,25	96,25	34	89,71	46,75	85,79		
8,75	97,05	21,5	96,21	34,25	89,65	47	85,75		
9	97,09	21,75	96,18	34,5	89,59	47,25	85,71		
9,25	97,15	22	96,13	34,75	89,51	47,5	85,67		
9,5	97,22	22,25	96,09	35	89,43	47,75	85,62		
9,75	97,28	22,5	96,02	35,25	89,38	48	85,59		
10	97,33	22,75	95,94	35,5	89,32	48,25	85,52		
10,25	97,37	23	95,86	35,75	89,29	48,5	84,36		
10,5	97,42	23,25	95,78	36	89,24	48,75	86,53		
10,75	97,46	23,5	95,63	36,25	89,17	49	86,58		
11	97,50	23,75	95,48	36,5	89,14	49,05	86,37		
11,25	97,53	24	95,29	36,75	89,08	49,1	86,20		
11,5	97,55	24,25	95,02	37	88,99	49,15	85,97		
11,75	97,57	24,5	94,67	37,25	88,93	49,2	85,67		
12	97,57	24,75	94,36	37,5	88,88	49,25	85,32		
12,25	97,53	25	94,15	37,75	88,80	49,3	84,91		
12,5	97,43	25,25	93,97	38	88,72	49,35	84,45		

$\tau, \text{МИН}$	$m, \%$	$\tau, \text{МИН}$	$m, \%$	$\tau, \text{МИН}$	$m, \%$	$\tau, \text{МИН}$	$m, \%$	$\tau, \text{МИН}$	$m, \%$
Шихта: $T = 800 \text{ }^\circ\text{C}$, $\delta = 300 \text{ мкм}$, $m_0 = 10,3 \text{ мг}$									
0	100,00	12,75	96,41	25,5	93,89	38,25	88,25	46	80,20
0,25	99,97	13	96,28	25,75	93,79	38,5	88,17	46,25	80,13
0,5	99,96	13,25	96,19	26	93,68	38,75	88,12	46,5	80,04
0,75	99,95	13,5	96,16	26,25	93,59	39	88,04	46,75	79,98
1	99,94	13,75	96,15	26,5	93,50	39,25	87,99	47	79,92
1,25	99,94	14	96,15	26,75	93,39	39,5	87,96	47,25	79,86
1,5	99,94	14,25	96,17	27	93,28	39,75	87,92	47,5	79,82
1,75	99,94	14,5	96,19	27,25	93,17	40	87,88	47,75	79,78
2	99,94	14,75	96,24	27,5	93,06	40,25	87,83	48	79,74
2,25	99,96	15	96,26	27,75	92,93	40,5	87,82	48,25	79,71
2,5	99,98	15,25	96,30	28	92,80	40,75	87,78	48,5	79,66
2,75	100,01	15,5	96,32	28,25	92,65	41	87,74	48,75	79,64
3	100,02	15,75	96,36	28,5	92,54	41,25	87,72	49	79,62
3,25	100,03	16	96,39	28,75	92,43	41,5	87,67	49,25	79,60
3,5	100,03	16,25	96,42	29	92,30	41,75	87,64	49,5	79,57
3,75	99,98	16,5	96,45	29,25	92,17	42	87,61	49,75	79,54
4	99,85	16,75	96,47	29,5	92,03	42,25	87,57	50	79,51
4,25	99,61	17	96,49	29,75	91,91	42,5	87,53	50,25	79,50
4,5	99,16	17,25	96,50	30	91,73	42,75	87,50	50,5	79,47
4,75	98,37	17,5	96,54	30,25	91,57	43	87,46	50,75	79,45
5	97,69	17,75	96,56	30,5	91,38	43,25	86,39	51	79,43
5,25	96,98	18	96,57	30,75	91,18	43,5	88,03	51,25	79,39
5,5	96,73	18,25	96,59	31	90,99	43,75	88,15	51,5	79,37
5,75	96,65	18,5	96,60	31,25	90,80	43,8	88,16	51,75	79,36
6	96,60	18,75	96,61	31,5	90,59	43,85	88,14	52	79,34
6,25	96,59	19	96,63	31,75	90,40	43,9	88,08	52,25	79,31
6,5	96,59	19,25	96,65	32	90,22	43,95	87,96	52,5	79,28
6,75	96,61	19,5	96,67	32,25	90,04	44	87,78	52,75	79,26
7	96,66	19,75	96,67	32,5	89,87	44,05	87,53	53	79,24
7,25	96,72	20	96,67	32,75	89,73	44,1	87,23	53,25	79,22
7,5	96,72	20,25	96,67	33	89,56	44,15	86,88	53,5	79,18
7,75	96,63	20,5	96,66	33,25	89,43	44,2	86,48	53,75	79,15
8	96,43	20,75	96,65	33,5	89,29	44,25	86,04	54	79,13
8,25	96,34	21	96,61	33,75	89,21	44,3	85,59	54,25	79,12
8,5	96,34	21,25	96,59	34	89,14	44,35	85,15	54,5	79,09
8,75	96,41	21,5	96,55	34,25	89,07	44,4	84,73	54,75	79,08
9	96,46	21,75	96,51	34,5	89,00	44,45	84,31	55	79,04
9,25	96,50	22	96,48	34,75	88,97	44,5	83,90	55,25	79,04
9,5	96,56	22,25	96,42	35	88,92	44,55	83,52	55,5	79,02
9,75	96,62	22,5	96,35	35,25	88,88	44,6	83,17	55,75	79,00
10	96,69	22,75	96,26	35,5	88,85	44,65	82,87		
10,25	96,73	23	96,16	35,75	88,82	44,7	82,61		
10,5	96,75	23,25	96,03	36	88,79	44,75	82,41		
10,75	96,79	23,5	95,87	36,25	88,75	44,8	82,24		
11	96,81	23,75	95,66	36,5	88,70	44,85	82,12		
11,25	96,84	24	95,36	36,75	88,64	44,9	82,02		
11,5	96,85	24,25	95,06	37	88,57	44,95	81,93		
11,75	96,85	24,5	94,72	37,25	88,52	45	81,84		
12	96,81	24,75	94,41	37,5	88,47	45,25	81,16		
12,25	96,72	25	94,17	37,75	88,41	45,5	80,61		
12,5	96,57	25,25	94,02	38	88,34	45,75	80,32		

τ ,МИН	m ,%	τ ,МИН	m ,%	τ ,МИН	m ,%	τ ,МИН	m ,%
Шихта: $T = 700$ °С, $\delta = 300$ мкм, $m_0 = 10,7$ мг							
0	100,00	12,75	101,33	25,5	97,93	38,25	92,99
0,25	100,00	13	101,22	25,75	97,80	38,5	92,97
0,5	99,98	13,25	101,10	26	97,68	38,75	92,94
0,75	99,98	13,5	100,93	26,25	97,58	39	92,91
1	99,98	13,75	100,69	26,5	97,50	39,25	92,87
1,25	100,00	14	100,60	26,75	97,31	39,5	92,85
1,5	100,01	14,25	100,57	27	97,21	39,75	92,80
1,75	100,02	14,5	100,58	27,25	97,06	40	92,79
2	100,07	14,75	100,60	27,5	96,98	40,25	91,50
2,25	100,07	15	100,61	27,75	96,83	40,5	93,02
2,5	100,10	15,25	100,65	28	96,69	40,75	93,03
2,75	100,15	15,5	100,69	28,25	96,56	41	93,02
3	100,20	15,75	100,70	28,5	96,42	41,25	92,05
3,25	100,25	16	100,73	28,75	96,28	41,5	91,12
3,5	100,29	16,25	100,78	29	96,19	41,75	90,28
3,75	100,32	16,5	100,79	29,25	96,01	42	89,85
4	100,36	16,75	100,81	29,5	95,87	42,25	89,63
4,25	100,41	17	100,81	29,75	95,76	42,5	89,57
4,5	100,45	17,25	100,81	30	95,54	42,75	89,51
4,75	100,47	17,5	100,83	30,25	95,37	43	89,51
5	100,51	17,75	100,88	30,5	95,16	43,25	89,50
5,25	100,53	18	100,89	30,75	94,93	43,5	89,52
5,5	100,58	18,25	100,93	31	94,79	43,75	89,56
5,75	100,64	18,5	100,99	31,25	94,52		
6	100,71	18,75	100,95	31,5	94,34		
6,25	100,76	19	100,97	31,75	94,15		
6,5	100,83	19,25	100,95	32	93,99		
6,75	100,93	19,5	100,97	32,25	93,88		
7	100,96	19,75	100,98	32,5	93,76		
7,25	101,04	20	100,94	32,75	93,64		
7,5	101,04	20,25	100,95	33	93,52		
7,75	100,87	20,5	100,97	33,25	93,43		
8	100,75	20,75	100,95	33,5	93,36		
8,25	100,69	21	100,92	33,75	93,29		
8,5	100,73	21,25	100,87	34	93,27		
8,75	100,80	21,5	100,83	34,25	93,22		
9	100,86	21,75	100,79	34,5	93,22		
9,25	100,91	22	100,73	34,75	93,20		
9,5	100,99	22,25	100,66	35	93,20		
9,75	101,07	22,5	100,59	35,25	93,19		
10	101,11	22,75	100,50	35,5	93,21		
10,25	101,15	23	100,39	35,75	93,18		
10,5	101,20	23,25	100,25	36	93,16		
10,75	101,23	23,5	100,10	36,25	93,15		
11	101,26	23,75	99,87	36,5	93,15		
11,25	101,30	24	99,61	36,75	93,12		
11,5	101,36	24,25	99,26	37	93,10		
11,75	101,40	24,5	98,82	37,25	93,07		
12	101,38	24,75	98,50	37,5	93,08		
12,25	101,39	25	98,24	37,75	93,05		
12,5	101,39	25,25	98,06	38	93,01		

τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %
Шихта: $T = 900$ °С, $\delta = 515$ мкм, $m_0 = 10,4$ мг									
0	100,00	12,75	100,81	25,5	97,25	38,25	91,97	48,8	86,70
0,25	100,04	13	100,64	25,75	97,13	38,5	91,89	48,85	86,26
0,5	100,07	13,25	100,46	26	97,05	38,75	91,84	48,9	85,82
0,75	100,09	13,5	100,38	26,25	96,96	39	91,81	48,95	85,40
1	100,14	13,75	100,36	26,5	96,85	39,25	91,70	49	84,98
1,25	100,18	14	100,35	26,75	96,76	39,5	91,63	49,05	84,57
1,5	100,23	14,25	100,35	27	96,66	39,75	91,57	49,1	84,17
1,75	100,29	14,5	100,37	27,25	96,56	40	91,48	49,15	83,77
2	100,35	14,75	100,39	27,5	96,46	40,25	91,40	49,2	83,42
2,25	100,38	15	100,39	27,75	96,35	40,5	91,34	49,25	83,10
2,5	100,44	15,25	100,42	28	96,24	40,75	91,26	49,3	82,81
2,75	100,48	15,5	100,42	28,25	96,13	41	91,16	49,35	82,57
3	100,52	15,75	100,43	28,5	96,03	41,25	91,09	49,4	82,37
3,25	100,56	16	100,44	28,75	95,93	41,5	90,98	49,45	82,20
3,5	100,62	16,25	100,46	29	95,82	41,75	90,89	49,5	82,00
3,75	100,65	16,5	100,48	29,25	95,70	42	90,80	49,75	81,80
4	100,71	16,75	100,48	29,5	95,56	42,25	90,69	50	81,72
4,25	100,75	17	100,48	29,75	95,43	42,5	90,60	50,25	81,68
4,5	100,81	17,25	100,48	30	95,31	42,75	90,51	50,5	81,62
4,75	100,84	17,5	100,50	30,25	95,16	43	90,38	50,75	81,56
5	100,89	17,75	100,50	30,5	95,01	43,25	90,33	51	81,53
5,25	100,93	18	100,53	30,75	94,81	43,5	90,16	51,25	81,50
5,5	100,99	18,25	100,52	31	94,65	43,75	90,07	51,5	81,45
5,75	101,06	18,5	100,52	31,25	94,49	44	90,00	51,75	81,43
6	101,12	18,75	100,52	31,5	94,31	44,25	89,93	52	81,41
6,25	101,18	19	100,52	31,75	94,13	44,5	89,89	52,25	81,37
6,5	101,22	19,25	100,52	32	93,97	44,75	89,81	52,5	81,34
6,75	101,24	19,5	100,52	32,25	93,82	45	89,76	52,75	81,31
7	101,11	19,75	100,52	32,5	93,64	45,25	89,72	53	81,29
7,25	100,92	20	100,50	32,75	93,48	45,5	89,64	53,25	81,24
7,5	100,80	20,25	100,44	33	93,36	45,75	89,63	53,5	81,23
7,75	100,78	20,5	100,39	33,25	93,23	46	89,57	53,75	81,23
8	100,82	20,75	100,39	33,5	93,13	46,25	89,50		
8,25	100,89	21	100,36	33,75	93,05	46,5	89,48		
8,5	100,94	21,25	100,29	34	92,96	46,75	89,42		
8,75	100,99	21,5	100,24	34,25	92,90	47	89,38		
9	101,02	21,75	100,14	34,5	92,84	47,25	89,37		
9,25	101,06	22	100,08	34,75	92,80	47,5	89,11		
9,5	101,08	22,25	99,96	35	92,75	47,75	87,78		
9,75	101,10	22,5	99,85	35,25	92,71	48	89,65		
10	101,10	22,75	99,73	35,5	92,66	48,25	89,62		
10,25	101,12	23	99,58	35,75	92,60	48,3	89,59		
10,5	101,12	23,25	99,36	36	92,58	48,35	89,52		
10,75	101,12	23,5	99,11	36,25	92,51	48,4	89,41		
11	101,16	23,75	98,80	36,5	92,47	48,45	89,23		
11,25	101,18	24	98,45	36,75	92,40	48,5	89,00		
11,5	101,18	24,25	98,06	37	92,35	48,55	88,72		
11,75	101,15	24,5	97,82	37,25	92,28	48,6	88,38		
12	101,10	24,75	97,62	37,5	92,21	48,65	88,00		
12,25	101,02	25	97,47	37,75	92,13	48,7	87,58		
12,5	100,94	25,25	97,34	38	92,05	48,75	87,14		

$\tau, \text{МИН}$	$m, \%$	$\tau, \text{МИН}$	$m, \%$	$\tau, \text{МИН}$	$m, \%$	$\tau, \text{МИН}$	$m, \%$	$\tau, \text{МИН}$	$m, \%$
Шихта: $T = 900 \text{ }^\circ\text{C}$, $\delta = 515 \text{ мкм}$, $m_0 = 5,5 \text{ мг}$									
0	100,00	12,75	105,32	25,5	102,84	38,25	100,83	51	98,71
0,25	100,00	13	105,32	25,75	102,75	38,5	100,78	51,25	98,82
0,5	99,96	13,25	105,32	26	102,68	38,75	100,71	51,3	98,78
0,75	99,96	13,5	105,32	26,25	102,63	39	100,60	51,35	98,70
1	99,96	13,75	105,36	26,5	102,57	39,25	100,49	51,4	98,54
1,25	99,95	14	105,36	26,75	102,57	39,5	100,42	51,45	98,29
1,5	99,98	14,25	105,43	27	102,50	39,75	100,31	51,5	97,95
1,75	99,98	14,5	105,47	27,25	102,44	40	100,22	51,55	97,53
2	100,07	14,75	105,50	27,5	102,39	40,25	100,11	51,6	97,04
2,25	100,11	15	105,59	27,75	102,35	40,5	100,09	51,65	96,49
2,5	100,18	15,25	105,67	28	102,32	40,75	100,00	51,7	95,89
2,75	100,27	15,5	105,74	28,25	102,23	41	99,80	51,75	95,24
3	100,40	15,75	105,79	28,5	102,23	41,25	99,71	51,8	94,63
3,25	100,49	16	105,83	28,75	102,19	41,5	99,64	51,85	94,06
3,5	100,63	16,25	105,92	29	102,12	41,75	99,55	51,9	93,55
3,75	100,78	16,5	105,99	29,25	102,12	42	99,44	51,95	93,08
4	100,92	16,75	106,03	29,5	102,08	42,25	99,35	52	92,67
4,25	101,05	17	106,03	29,75	102,08	42,5	99,24	52,05	92,32
4,5	101,20	17,25	106,12	30	102,01	42,75	99,11	52,1	92,04
4,75	101,36	17,5	106,16	30,25	101,97	43	98,99	52,15	91,83
5	101,48	17,75	106,19	30,5	101,96	43,25	98,86	52,2	91,66
5,25	101,63	18	106,25	30,75	101,94	43,5	98,79	52,25	91,52
5,5	101,77	18,25	106,28	31	101,92	43,75	98,71	52,5	91,13
5,75	101,88	18,5	106,30	31,25	101,88	44	98,61	52,75	90,97
6	102,05	18,75	106,30	31,5	101,88	44,25	98,50	53	90,89
6,25	102,21	19	106,36	31,75	101,85	44,5	98,41	53,25	90,78
6,5	102,41	19,25	106,39	32	101,85	44,75	98,35	53,5	90,73
6,75	102,57	19,5	106,43	32,25	101,81	45	98,32	53,75	90,62
7	102,75	19,75	106,43	32,5	101,85	45,25	98,28	54	90,57
7,25	102,97	20	106,46	32,75	101,79	45,5	98,24	54,25	90,57
7,5	103,04	20,25	106,46	33	101,81	45,75	98,15	54,5	90,42
7,75	103,04	20,5	106,45	33,25	101,74	46	98,10	54,75	90,42
8	103,04	20,75	106,45	33,5	101,72	46,25	98,01	55	90,33
8,25	103,13	21	106,43	33,75	101,72	46,5	97,95	55,25	90,33
8,5	103,30	21,25	106,39	34	101,68	46,75	97,90	55,5	90,30
8,75	103,51	21,5	106,36	34,25	101,70	47	97,85	55,75	90,22
9	103,71	21,75	106,28	34,5	101,68	47,25	97,81	56	90,17
9,25	103,87	22	106,23	34,75	101,65	47,5	97,70	56,25	90,13
9,5	104,02	22,25	106,14	35	101,61	47,75	97,65	56,5	90,11
9,75	104,15	22,5	106,05	35,25	101,58	48	97,57	56,75	90,04
10	104,31	22,75	105,92	35,5	101,54	48,25	97,54	57	90,01
10,25	104,45	23	105,79	35,75	101,50	48,5	97,47	57,25	89,93
10,5	104,58	23,25	105,56	36	101,45	48,75	97,36	57,5	89,90
10,75	104,71	23,5	105,31	36,25	101,41	49	97,32	57,75	89,86
11	104,82	23,75	104,98	36,5	101,34	49,25	97,23	58	89,82
11,25	104,92	24	104,58	36,75	101,30	49,5	97,19	58,25	89,77
11,5	105,05	24,25	104,15	37	101,21	49,75	97,16	58,5	89,72
11,75	105,14	24,5	103,73	37,25	101,18	50	97,12		
12	105,18	24,75	103,42	37,5	101,10	50,25	97,01		
12,25	105,25	25	103,15	37,75	101,01	50,5	96,98		
12,5	105,32	25,25	103,01	38	100,94	50,75	97,10		

τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %
Шихта: $T = 800$ °С, $\delta = 515$ мкм, $m_0 = 10,7$ мг									
0	100,00	12,75	101,53	25,5	97,76	38,25	92,60	45,75	83,02
0,25	100,03	13	101,43	25,75	97,68	38,5	92,53	46	82,95
0,5	100,01	13,25	101,31	26	97,55	38,75	92,46	46,25	82,88
0,75	100,03	13,5	101,14	26,25	97,43	39	92,39	46,5	82,84
1	100,07	13,75	101,03	26,5	97,35	39,25	92,30	46,75	82,77
1,25	100,09	14	100,95	26,75	97,24	39,5	92,29	47	82,74
1,5	100,13	14,25	100,95	27	97,13	39,75	92,24	47,25	82,69
1,75	100,17	14,5	100,95	27,25	97,02	40	92,24	47,5	82,66
2	100,21	14,75	100,96	27,5	96,93	40,25	92,20	47,75	82,58
2,25	100,24	15	100,98	27,75	96,79	40,5	92,18	48	82,60
2,5	100,31	15,25	101,00	28	96,65	40,75	92,13	48,25	82,55
2,75	100,36	15,5	101,02	28,25	96,52	41	92,07	48,5	82,52
3	100,43	15,75	101,05	28,5	96,44	41,25	92,08	48,75	82,53
3,25	100,49	16	101,05	28,75	96,31	41,5	92,05	49	82,47
3,5	100,53	16,25	101,07	29	96,22	41,75	91,98	49,25	82,44
3,75	100,58	16,5	101,06	29,25	96,11	42	91,95	49,5	82,40
4	100,64	16,75	101,08	29,5	95,96	42,25	91,90	49,75	82,36
4,25	100,72	17	101,09	29,75	95,89	42,5	91,86	50	82,36
4,5	100,75	17,25	101,10	30	95,74	42,75	90,41	50,25	82,32
4,75	100,80	17,5	101,13	30,25	95,59	43	91,79	50,5	82,32
5	100,86	17,75	101,13	30,5	95,51	43,25	92,22	50,75	82,29
5,25	100,89	18	101,15	30,75	95,36	43,28	92,24	51	82,28
5,5	100,96	18,25	101,15	31	95,20	43,33	92,23	51,25	82,23
5,75	101,00	18,5	101,15	31,25	95,01	43,38	92,19	51,5	82,20
6	101,07	18,75	101,15	31,5	94,85	43,43	92,09	51,75	82,18
6,25	101,13	19	101,13	31,75	94,70	43,48	91,95	52	82,15
6,5	101,18	19,25	101,12	32	94,56	43,53	91,75	52,25	82,15
6,75	101,23	19,5	101,12	32,25	94,36	43,58	91,49	52,5	82,13
7	101,31	19,75	101,10	32,5	94,22	43,63	91,19	52,75	82,09
7,25	101,33	20	101,08	32,75	94,13	43,68	90,83	53	82,09
7,5	101,26	20,25	101,07	33	93,94	43,73	90,42	53,25	82,05
7,75	101,16	20,5	101,07	33,25	93,81	43,78	89,99	53,5	82,03
8	101,15	20,75	101,01	33,5	93,75	43,83	89,56	53,75	82,03
8,25	101,17	21	100,97	33,75	93,66	43,88	89,14	54	81,97
8,5	101,24	21,25	100,90	34	93,64	43,93	88,71	54,25	81,97
8,75	101,32	21,5	100,87	34,25	93,55	43,98	88,28	54,5	81,97
9	101,36	21,75	100,79	34,5	93,53	44,03	87,86	54,75	81,96
9,25	101,44	22	100,68	34,75	93,45	44,08	87,46	55	81,94
9,5	101,48	22,25	100,61	35	93,41	44,13	87,09	55,25	81,93
9,75	101,51	22,5	100,50	35,25	93,37	44,18	86,73	55,5	81,89
10	101,54	22,75	100,40	35,5	93,33	44,23	86,40	55,75	81,89
10,25	101,57	23	100,27	35,75	93,28	44,28	86,12	56	81,89
10,5	101,59	23,25	100,09	36	93,22	44,33	85,88		
10,75	101,63	23,5	99,88	36,25	93,13	44,38	85,69		
11	101,64	23,75	99,62	36,5	93,09	44,43	85,53		
11,25	101,66	24	99,24	36,75	93,01	44,48	85,40		
11,5	101,67	24,25	98,92	37	92,93	44,5	85,33		
11,75	101,69	24,5	98,56	37,25	92,89	44,75	85,05		
12	101,70	24,75	98,26	37,5	92,81	45	84,07		
12,25	101,68	25	98,02	37,75	92,75	45,25	83,50		
12,5	101,63	25,25	97,87	38	92,60	45,5	83,20		

τ ,МИН	m ,%	τ ,МИН	m ,%	τ ,МИН	m ,%	τ ,МИН	m ,%	τ ,МИН	m ,%
Шихта: $T = 800$ °C, $\delta = 515$ мкм, $m_0 = 5,6$ мг									
0	100,00	12,75	104,96	25,5	101,97	38,25	100,14	47,2	93,11
0,25	100,00	13	104,99	25,75	101,86	38,5	100,05	47,25	92,91
0,5	100,00	13,25	105,05	26	101,79	38,75	99,96	47,3	92,74
0,75	100,04	13,5	105,07	26,25	101,77	39	99,89	47,35	92,59
1	100,04	13,75	105,07	26,5	101,73	39,25	99,82	47,4	92,43
1,25	100,07	14	105,12	26,75	101,66	39,5	99,78	47,45	92,29
1,5	100,11	14,25	105,16	27	101,59	39,75	99,78	47,5	92,16
1,75	100,11	14,5	105,23	27,25	101,59	40	99,75	47,75	91,71
2	100,11	14,75	105,32	27,5	101,50	40,25	99,69	48	91,53
2,25	100,20	15	105,34	27,75	101,46	40,5	99,66	48,25	91,33
2,5	100,29	15,25	105,43	28	101,46	40,75	99,59	48,5	91,24
2,75	100,38	15,5	105,50	28,25	101,41	41	99,51	48,75	91,16
3	100,52	15,75	105,55	28,5	101,37	41,25	99,48	49	91,07
3,25	100,61	16	105,59	28,75	101,35	41,5	99,44	49,25	91,02
3,5	100,74	16,25	105,68	29	101,30	41,75	99,39	49,5	90,91
3,75	100,88	16,5	105,73	29,25	101,26	42	99,33	49,75	90,88
4	101,01	16,75	105,79	29,5	101,23	42,25	99,28	50	90,88
4,25	101,14	17	105,91	29,75	101,21	42,5	99,21	50,25	90,79
4,5	101,28	17,25	105,93	30	101,17	42,75	99,15	50,5	90,79
4,75	101,39	17,5	105,97	30,25	101,19	43	99,13	50,75	90,66
5	101,51	17,75	106,00	30,5	101,23	43,25	99,01	51	90,61
5,25	101,59	18	106,04	30,75	101,19	43,5	98,97	51,25	90,53
5,5	101,69	18,25	106,08	31	101,15	43,75	98,90	51,5	90,52
5,75	101,82	18,5	106,09	31,25	101,15	44	98,88	51,75	90,48
6	101,98	18,75	106,15	31,5	101,12	44,25	98,77	52	90,44
6,25	102,09	19	106,15	31,75	101,08	44,5	98,74	52,25	90,39
6,5	102,27	19,25	106,11	32	101,08	44,75	98,70	52,5	90,35
6,75	102,38	19,5	106,13	32,25	101,05	45	98,67	52,75	90,32
7	102,60	19,75	106,09	32,5	101,01	45,25	98,59	53	90,28
7,25	102,72	20	106,09	32,75	101,03	45,5	98,54	53,25	90,25
7,5	102,83	20,25	106,09	33	100,99	45,75	98,92	53,5	90,23
7,75	102,83	20,5	106,09	33,25	100,99	46	99,68		
8	102,83	20,75	106,02	33,5	100,99	46,25	99,78		
8,25	102,92	21	106,00	33,75	100,99	46,3	99,80		
8,5	103,10	21,25	105,93	34	100,96	46,35	99,75		
8,75	103,25	21,5	105,90	34,25	100,92	46,4	99,64		
9	103,46	21,75	105,79	34,5	100,88	46,45	99,42		
9,25	103,66	22	105,73	34,75	100,88	46,5	99,11		
9,5	103,77	22,25	105,59	35	100,83	46,55	98,73		
9,75	103,93	22,5	105,46	35,25	100,81	46,6	98,24		
10	104,11	22,75	105,32	35,5	100,78	46,65	97,70		
10,25	104,22	23	105,12	35,75	100,76	46,7	97,09		
10,5	104,27	23,25	104,89	36	100,69	46,75	96,50		
10,75	104,38	23,5	104,60	36,25	100,63	46,8	95,94		
11	104,53	23,75	104,22	36,5	100,58	46,85	95,40		
11,25	104,58	24	103,80	36,75	100,52	46,9	94,94		
11,5	104,67	24,25	103,28	37	100,49	46,95	94,51		
11,75	104,76	24,5	102,85	37,25	100,41	47	94,16		
12	104,85	24,75	102,45	37,5	100,32	47,05	93,86		
12,25	104,89	25	102,20	37,75	100,29	47,1	93,61		
12,5	104,96	25,25	102,04	38	100,20	47,15	93,36		

τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %	τ , МИН	m , %
Шихта: $T = 700$ °С, $\delta = 515$ мкм, $m_0 = 10,4$ мг									
0	100,00	12,75	101,57	25,5	97,78	38,25	94,28	51	88,88
0,25	100,00	13	101,53	25,75	97,63	38,5	94,24	51,25	88,83
0,5	100,02	13,25	101,46	26	97,57	38,75	94,19	51,5	88,81
0,75	100,01	13,5	101,39	26,25	97,48	39	94,15	51,75	88,78
1	100,00	13,75	101,30	26,5	97,40	39,25	92,86	52	88,70
1,25	100,00	14	101,23	26,75	97,32	39,5	94,45	52,25	88,65
1,5	100,01	14,25	101,21	27	97,23	39,75	94,52	52,5	88,62
1,75	100,04	14,5	101,23	27,25	97,13	40	94,49	52,75	88,58
2	100,07	14,75	101,23	27,5	97,06	40,25	93,06	53	88,52
2,25	100,10	15	101,25	27,75	96,94	40,5	91,53	53,25	88,48
2,5	100,14	15,25	101,29	28	96,87	40,75	90,59	53,5	88,42
2,75	100,21	15,5	101,30	28,25	96,78	41	90,06	53,75	88,37
3	100,25	15,75	101,31	28,5	96,68	41,25	89,95	54	88,34
3,25	100,30	16	101,34	28,75	96,59	41,5	89,95	54,25	88,30
3,5	100,36	16,25	101,37	29	96,50	41,75	89,98	54,5	88,27
3,75	100,38	16,5	101,38	29,25	96,43	42	90,02	54,75	88,20
4	100,43	16,75	101,38	29,5	96,32	42,25	90,05	55	88,16
4,25	100,49	17	101,40	29,75	96,21	42,5	90,11	55,25	88,12
4,5	100,53	17,25	101,42	30	96,10	42,75	90,14	55,5	88,07
4,75	100,58	17,5	101,42	30,25	95,99	43	90,19	55,75	88,03
5	100,63	17,75	101,42	30,5	95,88	43,25	90,21	56	88,00
5,25	100,68	18	101,42	30,75	95,79	43,5	90,23	56,25	87,94
5,5	100,74	18,25	101,42	31	95,66	43,75	90,22	56,5	87,90
5,75	100,78	18,5	101,45	31,25	95,55	44	90,20	56,75	87,88
6	100,87	18,75	101,45	31,5	95,44	44,25	90,19	57	87,85
6,25	100,93	19	101,45	31,75	95,33	44,5	90,15	57,25	87,81
6,5	100,99	19,25	101,45	32	95,19	44,75	90,12	57,5	87,74
6,75	101,07	19,5	101,45	32,25	95,11	45	90,07	57,75	87,72
7	101,14	19,75	101,45	32,5	95,05	45,25	90,03	58	87,65
7,25	101,22	20	101,42	32,75	94,98	45,5	89,99	58,25	87,63
7,5	101,24	20,25	101,40	33	94,90	45,75	89,93	58,5	87,60
7,75	101,12	20,5	101,38	33,25	94,86	46	89,89	58,75	87,56
8	100,96	20,75	101,32	33,5	94,78	46,25	89,85	59	87,50
8,25	100,92	21	101,29	33,75	94,73	46,5	89,78	59,25	87,46
8,5	100,95	21,25	101,26	34	94,66	46,75	89,74	59,5	87,40
8,75	101,03	21,5	101,18	34,25	94,63	47	89,67	59,75	87,36
9	101,09	21,75	101,13	34,5	94,61	47,25	89,63	60	87,31
9,25	101,15	22	101,03	34,75	94,59	47,5	89,54	60,25	87,25
9,5	101,21	22,25	100,95	35	94,59	47,75	89,50	60,5	87,20
9,75	101,28	22,5	100,85	35,25	94,59	48	89,46		
10	101,32	22,75	100,76	35,5	94,56	48,25	89,42		
10,25	101,35	23	100,60	35,75	94,55	48,5	89,37		
10,5	101,38	23,25	100,44	36	94,54	48,75	89,31		
10,75	101,42	23,5	100,27	36,25	94,51	49	89,27		
11	101,46	23,75	100,02	36,5	94,49	49,25	89,22		
11,25	101,49	24	99,66	36,75	94,46	49,5	89,15		
11,5	101,53	24,25	99,26	37	94,44	49,75	89,11		
11,75	101,58	24,5	98,85	37,25	94,40	50	89,09		
12	101,60	24,75	98,43	37,5	94,37	50,25	89,02		
12,25	101,62	25	98,13	37,75	94,35	50,5	88,99		
12,5	101,61	25,25	97,93	38	94,32	50,75	88,92		

$\tau, \text{МИН}$	$m, \%$	$\tau, \text{МИН}$	$m, \%$	$\tau, \text{МИН}$	$m, \%$	$\tau, \text{МИН}$	$m, \%$	$\tau, \text{МИН}$	$m, \%$
Шихта: $T = 900 \text{ }^\circ\text{C}$, $\delta = 100 \text{ мкм}$, $m_0 = 19,4 \text{ мг}$, $25 \text{ }^\circ\text{C/мин}$									
0	100,00	12,75	101,22	25,5	101,43	38,25	98,95	51	95,72
0,25	100,00	13	101,24	25,75	101,44	38,5	98,91	51,25	95,64
0,5	100,00	13,25	101,25	26	101,45	38,75	98,86	51,5	95,57
0,75	100,00	13,5	101,26	26,25	101,44	39	98,81	51,75	95,49
1	100,00	13,75	101,28	26,5	101,45	39,25	98,76	52	95,43
1,25	99,99	14	101,30	26,75	101,46	39,5	98,70	52,25	94,88
1,5	99,98	14,25	101,32	27	101,46	39,75	98,66	52,5	94,48
1,75	99,99	14,5	101,32	27,25	101,46	40	98,58	52,75	95,30
2	100,01	14,75	101,34	27,5	101,47	40,25	98,59	53	95,34
2,25	100,01	15	101,37	27,75	101,47	40,5	98,56	53,25	95,36
2,5	100,01	15,25	101,40	28	101,46	40,75	98,52	53,5	95,03
2,75	100,02	15,5	101,41	28,25	101,46	41	98,48	53,75	94,11
3	100,03	15,75	101,41	28,5	101,46	41,25	98,47	54	92,98
3,25	100,04	16	101,42	28,75	101,46	41,5	98,43	54,25	91,80
3,5	100,05	16,25	101,43	29	101,46	41,75	98,41	54,5	90,58
3,75	100,08	16,5	101,44	29,25	101,46	42	98,38	54,75	89,37
4	100,08	16,75	101,46	29,5	101,46	42,25	98,34	55	88,20
4,25	100,10	17	101,47	29,75	101,43	42,5	98,31	55,25	87,07
4,5	100,14	17,25	101,47	30	101,30	42,75	98,28	55,5	86,07
4,75	100,16	17,5	101,48	30,25	101,29	43	98,23	55,75	85,18
5	100,20	17,75	101,47	30,5	101,27	43,25	98,21	56	84,46
5,25	100,22	18	101,47	30,75	101,24	43,5	98,15	56,25	84,14
5,5	100,25	18,25	101,47	31	101,23	43,75	98,09	56,5	84,03
5,75	100,28	18,5	101,49	31,25	101,24	44	98,04	56,75	83,96
6	100,31	18,75	101,49	31,5	101,24	44,25	97,96	57	83,91
6,25	100,34	19	101,48	31,75	101,20	44,5	97,89	57,25	83,84
6,5	100,38	19,25	101,47	32	101,17	44,75	97,78	57,5	83,82
6,75	100,42	19,5	101,46	32,25	101,07	45	97,70	57,75	83,81
7	100,46	19,75	101,45	32,5	101,03	45,25	97,58	58	83,77
7,25	100,49	20	101,44	32,75	101,01	45,5	97,50	58,25	83,74
7,5	100,53	20,25	101,42	33	101,01	45,75	97,42	58,5	83,76
7,75	100,57	20,5	101,41	33,25	100,99	46	97,33	58,75	83,74
8	100,60	20,75	101,40	33,5	100,96	46,25	97,24	59	83,72
8,25	100,63	21	101,39	33,75	100,93	46,5	97,16	59,25	83,69
8,5	100,68	21,25	101,39	34	100,86	46,75	97,06	59,5	83,66
8,75	100,72	21,5	101,37	34,25	100,81	47	96,98	59,75	83,68
9	100,75	21,75	101,37	34,5	100,74	47,25	96,90	60	83,65
9,25	100,77	22	101,36	34,75	100,68	47,5	96,79	60,25	83,63
9,5	100,82	22,25	101,36	35	100,56	47,75	96,69	60,5	83,63
9,75	100,85	22,5	101,36	35,25	100,43	48	96,63	60,75	83,59
10	100,89	22,75	101,36	35,5	100,25	48,25	96,54	61	83,60
10,25	100,92	23	101,36	35,75	100,10	48,5	96,45	61,25	83,58
10,5	100,96	23,25	101,36	36	99,94	48,75	96,37	61,5	83,59
10,75	100,99	23,5	101,36	36,25	99,79	49	96,30	61,75	83,56
11	101,03	23,75	101,39	36,5	99,62	49,25	96,23	62	83,52
11,25	101,06	24	101,39	36,75	99,51	49,5	96,16	62,25	83,53
11,5	101,09	24,25	101,40	37	99,38	49,75	96,10	62,5	83,53
11,75	101,12	24,5	101,40	37,25	99,29	50	96,01	62,75	83,49
12	101,15	24,75	101,41	37,5	99,19	50,25	95,94	63	83,52
12,25	101,17	25	101,41	37,75	99,12	50,5	95,84	63,25	83,50
12,5	101,20	25,25	101,42	38	99,04	50,75	95,79	63,5	83,45

τ ,МИН	m ,%	τ ,МИН	m ,%	τ ,МИН	m ,%	τ ,МИН	m ,%
Шихта: $T = 800$ °С, $\delta = 100$ мкм, $m_0 = 23,6$ мг, 25 °С/МИН							
0	100,00	12,75	100,81	25,5	97,47	38,25	86,12
0,25	99,99	13	100,82	25,75	97,43	38,5	85,75
0,5	100,02	13,25	100,82	26	97,40	38,75	85,41
0,75	100,05	13,5	100,60	26,25	97,36	39	85,04
1	100,08	13,75	100,57	26,5	97,32	39,25	84,67
1,25	100,08	14	100,54	26,75	97,27	39,5	84,39
1,5	100,09	14,25	100,51	27	97,22	39,75	84,15
1,75	100,10	14,5	100,48	27,25	97,16	40	84,00
2	100,12	14,75	100,46	27,5	97,08	40,25	83,93
2,25	100,13	15	100,45	27,75	96,99	40,5	83,87
2,5	100,15	15,25	100,44	28	96,89	40,75	83,82
2,75	100,17	15,5	100,42	28,25	96,80	41	83,78
3	100,17	15,75	100,42	28,5	96,72	41,25	83,75
3,25	100,20	16	100,39	28,75	96,63	41,5	83,72
3,5	100,22	16,25	100,38	29	96,56	41,75	83,69
3,75	100,24	16,5	100,33	29,25	96,48	42	83,65
4	100,27	16,75	100,25	29,5	96,41	42,25	83,63
4,25	100,30	17	100,20	29,75	96,33	42,5	83,61
4,5	100,32	17,25	100,15	30	96,25	42,75	83,58
4,75	100,34	17,5	100,09	30,25	96,17	43	83,56
5	100,37	17,75	100,00	30,5	96,08	43,25	83,55
5,25	100,40	18	99,88	30,75	96,00	43,5	83,53
5,5	100,44	18,25	99,75	31	95,91	43,75	83,51
5,75	100,47	18,5	99,56	31,25	95,85	44	83,49
6	100,49	18,75	99,42	31,5	95,79	44,25	83,47
6,25	100,48	19	99,28	31,75	95,74	44,5	83,46
6,5	100,44	19,25	99,12	32	95,70	44,75	83,44
6,75	100,43	19,5	98,98	32,25	95,67	45	83,43
7	100,44	19,75	98,87	32,5	95,64	45,25	83,41
7,25	100,47	20	98,76	32,75	95,61	45,5	83,40
7,5	100,51	20,25	98,67	33	95,58	45,75	83,38
7,75	100,55	20,5	98,57	33,25	95,55		
8	100,58	20,75	98,47	33,5	95,52		
8,25	100,62	21	98,21	33,75	95,50		
8,5	100,64	21,25	98,16	34	95,17		
8,75	100,66	21,5	98,10	34,25	94,94		
9	100,68	21,75	98,05	34,5	94,96		
9,25	100,69	22	98,01	34,75	94,97		
9,5	100,71	22,25	97,97	35	95,00		
9,75	100,73	22,5	97,93	35,25	94,28		
10	100,75	22,75	97,90	35,5	93,43		
10,25	100,77	23	97,87	35,75	92,47		
10,5	100,78	23,25	97,85	36	91,47		
10,75	100,80	23,5	97,82	36,25	90,46		
11	100,81	23,75	97,80	36,5	89,47		
11,25	100,79	24	97,77	36,75	88,51		
11,5	100,79	24,25	97,75	37	87,65		
11,75	100,80	24,5	97,63	37,25	86,94		
12	100,80	24,75	97,58	37,5	86,43		
12,25	100,80	25	97,55	37,75	86,21		
12,5	100,81	25,25	97,51	38	86,16		

τ ,МИН	m ,%	τ ,МИН	m ,%	τ ,МИН	m ,%	τ ,МИН	m ,%
Шихта: $T = 700$ °С, $\delta = 100$ мкм, $m_0 = 14,2$ мг, 25 °С/МИН							
0	100,00	12,75	102,84	25,5	99,68	38,25	93,05
0,25	99,99	13	102,87	25,75	99,63	38,5	93,04
0,5	99,99	13,25	102,90	26	99,59	38,75	93,02
0,75	99,99	13,5	102,92	26,25	99,54	39	93,01
1	99,99	13,75	102,91	26,5	99,50	39,25	92,99
1,25	99,99	14	102,83	26,75	99,46	39,5	92,98
1,5	100,01	14,25	102,69	27	99,41	39,75	92,97
1,75	100,04	14,5	102,54	27,25	99,34	40	92,96
2	100,07	14,75	102,42	27,5	99,30	40,25	92,94
2,25	100,11	15	102,35	27,75	99,26	40,5	92,92
2,5	100,15	15,25	102,30	28	99,20	40,75	92,91
2,75	100,21	15,5	102,28	28,25	99,16	41	92,89
3	100,26	15,75	102,26	28,5	99,13	41,25	92,86
3,25	100,32	16	102,24	28,75	99,09	41,5	92,84
3,5	100,38	16,25	102,21	29	99,04	41,75	92,82
3,75	100,44	16,5	102,19	29,25	99,00	42	92,80
4	100,50	16,75	102,14	29,5	98,97	42,25	92,77
4,25	100,56	17	102,06	29,75	98,94	42,5	92,76
4,5	100,62	17,25	101,97	30	98,84	42,75	92,72
4,75	100,68	17,5	101,87	30,25	97,65	43	92,70
5	100,75	17,75	101,79	30,5	96,99	43,25	92,68
5,25	100,82	18	101,70	30,75	97,21	43,5	92,64
5,5	100,90	18,25	101,58	31	97,90	43,75	92,62
5,75	100,98	18,5	101,45	31,25	98,15	44	92,59
6	101,07	18,75	101,31	31,5	98,14	44,25	92,57
6,25	101,15	19	101,16	31,75	97,36	44,5	92,54
6,5	101,23	19,25	101,01	32	96,16	44,75	92,51
6,75	101,31	19,5	100,86	32,25	94,88	45	92,49
7	101,41	19,75	100,74	32,5	93,72	45,25	92,45
7,25	101,52	20	100,63	32,75	92,87	45,5	92,44
7,5	101,62	20,25	100,53	33	92,43	45,75	92,42
7,75	101,71	20,5	100,43	33,25	92,29	46	92,39
8	101,80	20,75	100,34	33,5	92,26	46,25	92,36
8,25	101,90	21	100,27	33,75	92,28	46,5	92,33
8,5	101,99	21,25	100,21	34	92,37	46,75	92,31
8,75	102,07	21,5	100,16	34,25	92,48		
9	102,15	21,75	100,11	34,5	92,58		
9,25	102,22	22	100,06	34,75	92,67		
9,5	102,29	22,25	100,02	35	92,75		
9,75	102,36	22,5	99,99	35,25	92,83		
10	102,42	22,75	99,95	35,5	92,87		
10,25	102,48	23	99,92	35,75	92,93		
10,5	102,52	23,25	99,90	36	92,97		
10,75	102,56	23,5	99,88	36,25	93,01		
11	102,60	23,75	99,86	36,5	93,01		
11,25	102,63	24	99,83	36,75	93,04		
11,5	102,67	24,25	99,81	37	93,04		
11,75	102,71	24,5	99,79	37,25	93,04		
12	102,74	24,75	99,77	37,5	93,06		
12,25	102,78	25	99,74	37,75	93,06		
12,5	102,81	25,25	99,71	38	93,06		