

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский  
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Горно – металлургический институт

Кафедра металлургии и обогащения полезных ископаемых

Касымбеков Бексултан Жумадильдинович

Разработка методов совершенствования тепловой работы печи Ванюкова на Балхашском  
медеплавильном заводе

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

7M07201 – «Автоматизация и цифровизация металлургических процессов»

Алматы 2026

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский  
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Горно металлургический институт имени О.А. Байконурова

Кафедра металлургии и обогащения полезных ископаемых

Касымбеков Бексултан Жумадильдинович

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**  
На соискание академической степени магистра

Название диссертации

Разработка методов совершенствования тепловой работы печи  
Ванюкова на Балхашском медеплавильном заводе

Направление подготовки

7M07201 – «Автоматизация и цифровизация металлургических  
процессов»

Научный руководитель  
Д-р ph.D., канд. техн. наук,  
ассоциированный профессор  
 Чепуштанова Т.А.  
«15» 01 2026 г.

**ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ**  
НАО «КазНИТУ им.К.И.Сатпаева»  
Горно-металлургический институт  
им. О.А. Байконурова

Рецензент  
Д-р тех. наук, зав. лабораторией  
пирометаллургии АО «ИМиО»  
 Квятковский С.А.  
«15» 01 2026 г.

Нормоконтроль  
канд. техн. наук, ст. преподаватель  
 Коныратбекова С.С.  
«15» 01 2026 г.

**ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ**  
Канд. техн. наук, заведующая кафедрой  
МиОПИ  
 Барменшинова М.Б.  
«15» 01 2026 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский  
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Горно металлургический институт имени О.А. Байконурова

Кафедра Металлургия и обогащение полезных ископаемых

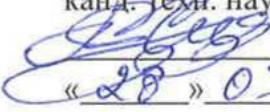
7М07201 – «Автоматизация и цифровизация металлургических процессов»

**УТВЕРЖДАЮ**

Заведующая кафедрой

МПТиТСМ, PhD

канд. техн. наук, профессор

 Чепуштанова Т.А.  
«28» 03 2024 г.

**ЗАДАНИЕ  
на выполнение магистерской диссертации**

Магистранту Касымбекову Бексултану Жумадильдиновичу

Тема *Разработка методов совершенствования тепловой работы печи Ванюкова на Балхашском медеплавильном заводе*

Утверждена приказом Ректора Университета №133-П/Ө от «28» марта 2024 г.

Срок сдачи законченный диссертации «01» января 2026 г.

Исходные данные к магистерской диссертации: научная, учебная и методическая литература по теме диссертации, материалы по опытно – промышленным испытаниям использования угля и антрацита для восполнения тепла процесса ПВ на БМЗ

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

а) *современное состояние рассматриваемой проблемы недостатка тепла на печах Ванюкова и в целом автогенных плавок*

б) *проведение опытно – промышленных испытаний на ПВ по восполнению тепла углем класса «орешек» и антрацита на БМЗ*

Перечень графического материала не менее 23 слайдов с результатами исследований.

Рекомендуемая основная литература:

1 Квятковский С.А., Дюсебекова М.А. Тепловой поток и оптимизация теплового режима в печах автогенной плавки // Цветная металлургия. – 2014. – №3. – С. 22–37.

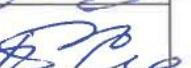
2 Квятковский С.А., Досмухамедов С.А. Тепловой анализ и оптимизация промышленной автогенной плавки // Цветная металлургия. – 2016. – №5. – С. 30–46.

**ГРАФИК**  
подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки предоставления научному руководителю	Примечание
Введение	02.10.2025 г.	
Аналитический обзор литературы	21.11.2025 г.	
Практическая часть	21.11.2025 г.	
Термодинамический анализ	11.11.2025 г.	
Заключение	28.12.2025 г.	

**Подписи**

консультантов и нормоконтролера на законченную магистерскую диссертацию с указанием относящихся к ним разделов работы

Наименование разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Введение	Т.А. Чепуштанова	02.10.2025	
Аналитический обзор литературы	д-р ph.D., канд. техн. наук,	21.11.2025	
Термодинамический анализ	ассоц.профессор	21.11.2025	
Экспериментальная часть		11.11.2025	
Заключение		28.12.2025	
Нормоконтролер	С.С. Коныратбекова канд. техн. наук	15.01.2026.	

Научный руководитель

Чепуштанова Т.А.

Задание принял к исполнению обучающийся

Касымбеков Б.Ж.

Дата «28 03 2024 г.

## АНДАТПА

Магистрлік дипломдық жұмыс Балқаш мыс қорыту зауытындағы Ванюков пешінің жылулық жұмысын жетілдіруге арналған. Мысты сульфидті концентраттарды автогенде балқыту процесінің жылу шығару ерекшеліктері талданып, пештің жылу балансы бағаланды және жылу шығындарының негізгі көздері анықталды. Жылу тапшылығын өтеуге бағытталған тәжірибелік-өнеркәсіптік сынақтар жүргізіліп, Ванюков пешінде көмірді қолдана отырып шихтаны балқыту процесін тұрақты жүргізу мүмкіндігі расталды. Үрлеу параметрлерін онтайландыру және процестің энергия тиімділігін арттыру бойынша іс-шаралар ұсынылды. Жұмыс 76 беттен тұрады, 27 сурет және 9 кестені қамтиды.

## АННОТАЦИЯ

Магистерская дипломная работа посвящена совершенствованию тепловой работы печи Ванюкова Балхашского медеплавильного завода. Проанализированы теплотворные особенности автогенной плавки медных сульфидных концентратов, выполнена оценка теплового баланса и выявлены основные источники теплопотерь. Проведены опытно-промышленные испытания по восполнению недостатка тепла, подтвердившие возможность устойчивого ведения процесса плавки шихты на ПВ с применением углей. Предложены мероприятия по оптимизации параметров дутья и повышению энергоэффективности процесса. Работа изложена на 76 страницах, содержит 27 рисунков и 9 таблиц.

## ANNOTATION

The master's thesis is devoted to the improvement of the thermal performance of the Vanyukov furnace at the Balkhash Copper Smelting Plant. The thermal characteristics of autogenous smelting of copper sulfide concentrates were analyzed, the heat balance was evaluated, and the main sources of heat losses were identified. Pilot-scale industrial trials aimed at compensating for the heat balance deficit were carried out, confirming the possibility of stable smelting operation in the Vanyukov furnace using coal. Measures for optimizing blast parameters and increasing the energy efficiency of the process were proposed. The thesis comprises 76 pages and includes 27 figures and 9 tables.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	8
1 Критический анализ литературных и патентных данных	11
1.1 Термодинамическое и энергетическое моделирование	18
1.2 Автоматизация и интеллектуальные системы управления	19
1.3 CFD-моделирование и анализ многофазного потока	21
1.4 Экологические и энергоэффективные исследования	22
2 Экспериментальная часть	26
2.1 Объекты исследования	26
2.2 Период испытаний	26
2.2.1 Расход и состав шихты	26
2.2.2 Расход угля	28
2.2.3 Паропроизводительность котла-утилизатора	30
2.2.4 Настылеобразование на воротнике котла-утилизатора	30
2.2.5 Температурный режим	31
2.2.6 Составы основных продуктов плавки	38
2.2.7 Сравнение расчетных и фактических показателей плавки	42
2.3 Полнота и корректность данных. Анализ параметров работы ПВ-2	43
2.4 Изучение механического разрушения угля	45
2.4.1 Угли первого периода испытаний	45
2.5 Проведение аналитических исследований состава и свойств углей	48
2.6 Технико-экономические показатели использования угля класса «орешек» и антрацита для компенсации дефицита тепла при плавки медного сульфидного сырья в печи Ванюкова	50
3 Автоматизации и управления технологическими процессами	55
3.1 Система автоматизации и управления технологическими процессами печей Ванюкова на БМЗ	55
3.1.1 Верхний уровень АСУТП (диспетчерский уровень)	59
3.1.2 Средний уровень АСУТП (технологический уровень)	59

3.1.3 Управление мазутно-нагревательными установками (МНУ)	60
3.1.4 Полевой уровень и распределённый ввод-вывод	60
3.1.5 Коммуникационная инфраструктура АСУТП	61
3.1.6 Информационное взаимодействие с MES и PI System	61
3.1.7 Общая оценка уровня автоматизации	62
Заключение	63
Список использованной литературы	66
Приложение А	69
Приложение Б	75
Приложение В	76

## ВВЕДЕНИЕ

*Современное состояние научно-технической проблемы.* В настоящее время печи Ванюкова широко применяются для переработки медного сульфидного сырья благодаря высокой интенсивности процесса, эффективному использованию кислорода и возможности переработки сложных концентратов.

Вместе с тем эксплуатация печей Ванюкова сопровождается рядом научно-технических проблем, ключевыми из которых являются:

- 1 Обеспечение стабильного теплового режима плавки при колебаниях состава и производительности шихты;
- 2 Снижение удельного расхода дорогостоящих видов топлива (мазута, природного газа);
- 3 Повышение точности и достоверности измерения температуры расплава в условиях агрессивной высокотемпературной среды;
- 4 Совершенствование систем автоматизации и сбора технологических данных, обеспечивающих корректное управление процессом и последующий анализ.

Существующие АСУТП печей Ванюкова, как показано на примере ПВ-1 и ПВ-2 БМЗ, в основном ориентированы на локальное управление и визуализацию, при этом характеризуются децентрализованным хранением данных, ограниченными возможностями аналитики и рядом проблем в корректности измерений ключевых параметров (расходы дутья, кислорода, температура расплава). Это свидетельствует о необходимости комплексного научно-технического анализа технологического процесса в сочетании с развитием методов его автоматизации.

Целью работы является исследование возможности использования каменного угля класса «орешек» и антрацита для компенсации дефицита тепла при плавке медного сульфидного сырья в печи Ванюкова, а также анализ и совершенствование системы автоматизации и контроля технологических параметров процесса с целью повышения его устойчивости, энергоэффективности и управляемости.

*Задачи работы:*

- 1 Провести опытно-промышленные испытания использования каменного угля класса «орешек» и антрацита «Южный Кузбасс» в печи Ванюкова ПВ-2 БМЗ.
- 2 Исследовать влияние вида и расхода угля на тепловой режим плавки, паропроизводительность котла-утилизатора и температурные параметры процесса.
- 3 Оценить степень усвоения угля ванной расплава и величину пылевыноса при различных условиях эксплуатации.
- 4 Проанализировать гранулометрическое разрушение угля при транспортировке от ПУФ до загрузки в печь.

5 Выполнить физико-химические исследования состава углей и продуктов плавки.

6 Сравнить расчетные и фактические показатели теплового баланса плавки.

7 Проанализировать полноту и корректность данных, получаемых средствами существующей АСУТП.

8 Оценить технико-экономическую эффективность использования угля и антрацита для компенсации дефицита тепла.

9 Сформулировать рекомендации по оптимизации технологического режима и системы автоматизации.

*Научная новизна работы заключается в разработки методов совершенствования тепловой работы печи Ванюкова, заключающихся в использовании угля класса «орешек» и антрацита в качестве единственного топлива для регулирования теплового режима печи Ванюкова без применения мазута;*

– в установлении количественной оценки степени усвоения угля ванной расплава (не менее 90 %) с учетом фактического пылевыноса;

– в установлении взаимосвязи между гранулометрическим разрушением угля при транспортировке, его пылевыносом и склонностью к настылеобразованию в котле-утилизаторе;

– в выявлении системных ограничений существующей архитектуры АСУТП печей Ванюкова с точки зрения корректности измерений и хранения технологических данных;

– установлено, что наиболее экономически эффективным является использование угля класса «орешек» «Комир Тау», обеспечивающее экономический эффект порядка 430 млн тг в год на одну печь Ванюкова при отказе от мазута.

*Актуальность проблемы.* Актуальность выполненной работы обусловлена:

1 ростом стоимости традиционных энергоносителей (мазута и природного газа);

2 необходимостью повышения энергоэффективности и экологичности пирометаллургических процессов;

3 потребностью в снижении эксплуатационных затрат при сохранении стабильности технологического режима;

4 возрастающими требованиями к качеству автоматизированного управления, достоверности технологических данных и возможности их анализа;

5 практической значимостью результатов для действующих металлургических предприятий, эксплуатирующих печи Ванюкова.

*Теоретическая и методологическая основа написания работы.* Теоретической и методологической основой работы послужили: фундаментальные положения пирометаллургии цветных металлов; теория тепловых балансов металлургических агрегатов; принципы газо- и

тепломассообмена в барботируемых расплавах; методы физико-химического анализа сырья и продуктов плавки; современные подходы к построению и анализу АСУТП металлургических процессов [1]; нормативные документы и государственные стандарты (ГОСТ) по методам анализа углей и материалов.

*Практическая база написания работы.* Исследования проводились в лаборатории спецкурсов (аудиториях 301 и 306 ГМК корпуса) кафедры «Металлургические процессы, теплотехника и технология специальных материалов», кафедры «Металлургии и обогащения полезных ископаемых» с использованием современного лабораторного оборудования и качественных химических реагентов, физико-химические исследования образцов выполнялись в лабораториях АО Института металлургии и обогащения полезных ископаемых. Практической базой работы послужили: опытно-промышленные испытания, проведенные на плавильном агрегате ПВ-2 Балхашского медеплавильного завода в период с 31.05 по 08.06.2025 г.; данные системы PI System и производственные журналы операторов БМЗ.

*Обоснование необходимости выполнения работы.* Необходимость выполнения данной работы обусловлена тем, что: существующие режимы плавки в печах Ванюкова характеризуются высокой зависимостью от дорогостоящих видов топлива; отсутствует достаточная экспериментальная база по длительному использованию угля в качестве основного регулирующего топлива; имеются системные проблемы в корректности измерений ключевых технологических параметров и их представления в АСУТП; полученные результаты могут быть непосредственно использованы для оптимизации промышленного процесса, снижения затрат и повышения устойчивости работы печей Ванюкова.

## 1 Критический анализ литературных и патентных данных

Печи Ванюкова – это автогенные плавильные агрегаты, применяемые в металлургии для переработки медных, медно-никелевых и других сульфидных концентратов. Они обеспечивают высокую температуру ванны ( $1300 - 1450^{\circ}\text{C}$ ), интенсивное смешение тепло- и массопереноса и сложные химические реакции окисления и восстановления. Эффективность работы агрегата определяется стабильностью теплового режима, равномерным распределением концентрата и топлива, минимизацией потерь металлов со шлаком, снижением расхода топлива и выбросов диоксида серы.

Актуальность исследования определяется необходимостью повышения коэффициента извлечения меди и золота, уменьшения расхода топлива, снижения экологической нагрузки и продления срока службы футеровки. Эти вопросы особенно актуальны для Балхашского медеплавильного завода и других промышленных объектов с автогенной плавкой.

Цель обзора – систематизировать современные знания о печах Ванюкова, выявить закономерности теплового и материального баланса, проанализировать методы оптимизации и оценить степень изученности различных аспектов.

Современные исследования теплового режима и управления автогенными печами, аналогичными печам Ванюкова, демонстрируют как теоретический, так и практический прогресс в металлургии. Основная цель большинства работ – повышение стабильности процесса, уменьшение потерь металлов и оптимизация расхода топлива при переработке медных и сульфидных концентратов.

В работе «Нейроэмимитор теплового режима печи Ванюкова для медно-никелевых концентратов» Писарёв С.А. предложил использование нейросетевых алгоритмов для моделирования распределения температуры в ванне и прогнозирования влияния интенсивности дутья на кинетику окислительных реакций. Автор подробно описывает архитектуру нейросети, процесс обучения на основе экспериментальных данных промышленных плавок и алгоритмы прогнозирования температурных полей. Работа демонстрирует, что локальные перегревы ванны негативно сказываются на коэффициенте извлечения меди, а стабильное распределение температуры способствует повышению эффективности плавки. При этом, имеется возможность дальнейшего исследования взаимодействия фаз, химический состав ванны и влияние распределения концентрата на локальные перегревы.

В «Математическом моделировании процессов в печах Ванюкова на основе полного факторного эксперимента» Данилова Е.В. сосредоточилась на построении математической модели работы печи с использованием метода полного факторного эксперимента. Основное внимание уделяется трем ключевым параметрам: подача концентрата, температура дутья и содержание сульфидов в шихте. Автор описывает методику планирования экспериментов и статистический анализ, включая построение моделей зависимости потерь

меди и золота от технологических параметров. Результаты показывают, что увеличение подачи концентрата без соответствующей регулировки температуры дутья приводит к росту потерь металла, что подчеркивает необходимость комплексного подхода к контролю технологического процесса.

В работе «Динамическое моделирование печи Ванюкова с фазовым составом ванны» Суляев А.Н. представил динамическую модель, учитывающую фазовый состав металла и шлака, скорость химических реакций и теплопотери. Модель детально описывает кинетику окислительных процессов и взаимодействие фаз, что позволяет прогнозировать изменения температуры и состава ванны в реальном времени. Автор демонстрирует, что изменение температуры дутья на  $\pm 10$  °C существенно влияет на коэффициент извлечения меди. Довольно хорошо описано теоретическое моделирования и понимание динамики процесса, однако экспериментальная проверка ограничена промышленными испытаниями на коротких циклах, что снижает прямую применимость для длительной эксплуатации.

В «Оптимизации технологических режимов печи Ванюкова для снижения потерь металлов и расхода топлива» Оленникова И.В. сосредоточилась на практических методах оптимизации параметров печи. Автор анализирует влияние температуры шлака, интенсивности дутья и состава кислородно-топливной смеси. Работа показывает, что поддержание температуры шлака 1200 – 1250 °C снижает потери меди, а применение кислородно-топливной смеси оптимизирует расход топлива.

В «Аналиze влияния подачи концентрата и температуры дутья на стабильность работы печи Ванюкова» Фёдоров В.И. провел систематический анализ промышленных данных, моделируя зависимость потерь меди и золота от изменения технологических параметров. Автор показывает, что поддержание температуры ванны в пределах  $\pm 5$  °C снижает потери металлов, подчеркивая значимость точного контроля процесса. Работа хорошо раскрывает стабилизацию теплового режима, однако отсутствует анализ экологических аспектов и автоматизированного управления.

В «Влиянии теплового режима на износ футеровки печей Ванюкова» Матркаимов Р.А. исследует механизмы деградации огневой поверхности и методы стабилизации температурных полей с использованием автоматизации. Работа демонстрирует, что внедрение систем управления увеличивает срок службы футеровки на 10 – 12 %.

Кенжалинов Б. в «Интеллектуальных системах управления печами Ванюкова на Балхашском медеплавильном заводе» описывает алгоритмы автоматической подачи концентрата и дутья, их влияние на стабильность процесса и потери меди. Работа показывает снижение потерь металла на 1,2 – 1,8 % и повышение стабильности плавки. В работе подробно раскрыта автоматизация [12].

В «Сравнении ручного и автоматизированного управления печью Ванюкова» Квятковский С.А. проводит сравнительный анализ. Автоматизация поддерживает температуру  $\pm 5$  °С, снижает колебания потерь меди и повышает производительность на 3 – 4 %. Работа включает анализ практического внедрения и экономической эффективности [3].

Иванов П.С. в «Методах расчёта теплового баланса печей Ванюкова» рассматривает термодинамические методы расчёта теплопотерь через футеровку и шлак, а также влияние температуры дутья. Автор отмечает ограничения существующих методов из-за упрощений химических процессов.

В «Влиянии распределения концентрата и интенсивности дутья на стабильность плавки» Смирнов А.В. использует статистический анализ и моделирование распределения шихты. Работа показывает, что неравномерное распределение концентрата приводит к локальным перегревам и снижению извлечения меди.

В работе «Исследование теплового режима печи Ванюкова при переработке медных концентратов» Данилов В.И. уделяет особое внимание особенностям формирования теплового поля внутри печи и влиянию технологических параметров на эффективность извлечения меди. Автор подробно описывает методику наблюдений и фиксации температуры в различных точках ванны, анализирует влияние изменения подачи концентрата и интенсивности дутья на локальные перегревы. Результаты исследования показывают, что недостаточная равномерность распределения концентрата способствует возникновению горячих и холодных зон, что снижает коэффициент извлечения металлов. Данилов делает акцент на необходимости системного подхода к контролю теплового режима и анализе зависимости параметров от состава шихты, а также обсуждает потенциальные преимущества автоматизации процесса, хотя конкретные алгоритмы управления не представлены.

Сергеева Е.В. в «Моделировании химических процессов в печах Ванюкова» сосредоточилась на создании модели, описывающей окислительно-восстановительные реакции в процессе плавки сульфидных концентратов. Автор применяет комплексный подход, сочетая термодинамический анализ и математическое моделирование, что позволяет оценить влияние технологических изменений на эффективность извлечения металлов. Работа демонстрирует, что оптимизация температуры дутья и равномерное распределение концентрата позволяют снизить потери меди и золота, повысив стабильность процесса. Особое внимание уделяется необходимости интеграции температурного режима и химического состава ванны, что является ключевым для точного контроля процесса и минимизации потерь.

В «Автоматизации управления печами Ванюкова: опыт Балхашского завода» Фролов А.Н. подробно описывает внедрение автоматизированных систем управления, регулирующих подачу концентрата и дутья. Автор

анализирует влияние автоматизации на стабильность теплового режима, потери металлов и производительность печи. Результаты показывают, что автоматизация снижает колебания температуры ванны и стабилизирует извлечение меди, улучшая условия для равномерного плавления концентрата.

В работе «Особенности распределения шихты и влияние на тепловой баланс» Киселев С.А. изучает механизмы распределения шихты внутри печи и их влияние на локальные температуры и эффективность извлечения металлов. Автор применяет методы наблюдения и моделирования для оценки плотности концентрации материала, интенсивности смешения и влияния этих факторов на тепловое поле. Работа показывает, что неравномерная загрузка концентрата приводит к появлению горячих и холодных зон, повышает потери металлов и снижает эффективность процесса.

Захарова Е.В. в «Влиянии состава топлива и дутья на стабильность работы печи Ванюкова» анализирует влияние состава топлива и условий подачи кислородного дутья на тепловой режим и извлечение металлов. Автор опирается на промышленные данные и выявляет корреляцию между изменением состава топлива и равномерностью плавки. Работа показывает, что корректировка смеси топлива и дутья снижает локальные перегревы и повышает стабильность извлечения меди, что подчеркивает важность интеграции топливных характеристик с системами контроля температуры.

В «Моделях теплопередачи и их практическом применении» Мартынов В.И. создает модели теплопередачи в печи Ванюкова, учитывая процессы конвекции, теплопроводности и излучения. Автор анализирует, как распределение тепла влияет на извлечение меди и стабильность плавки, и рассматривает возможности прогнозирования поведения печи при изменении технологических параметров. Работа показывает, что правильное моделирование теплопередачи позволяет выявить зоны локального перегрева и оптимизировать подачу концентрата и дутья для повышения эффективности процесса.

Беляев А.Н. в «Применении интеллектуальных систем управления для повышения эффективности плавки» исследует внедрение адаптивных регуляторов, контролирующих температуру и подачу концентрата. Работа демонстрирует улучшение стабильности теплового режима и повышение коэффициента извлечения меди и золота. Автор анализирует практическую реализацию систем на промышленных печах, но не рассматривает подробно химические процессы шлака.

Сидоренко П.С. в «Особенностях эксплуатации печей Ванюкова в медеплавильном производстве» изучает опыт эксплуатации на разных заводах, анализируя типичные проблемы: локальные перегревы, потери металлов и износ футеровки. Автор делает акцент на значении равномерного распределения концентрата и контроля температурного режима, а также необходимости автоматизации и мониторинга.

Ларионов В.И. в «Системах наблюдения и контроля температуры в печах Ванюкова» анализирует использование датчиков температуры и систем контроля для мониторинга теплового режима. Работа описывает методику установки датчиков, обработку данных и интеграцию с системами управления. Автор показывает, что стабильный контроль температуры позволяет снизить локальные перегревы и повысить коэффициент извлечения металлов.

Кравцов С.А. в «Эффективности теплового режима при переработке сульфидных концентратов» анализирует влияние теплового режима на эффективность извлечения меди и золота. Работа подчеркивает важность равномерного теплового поля и оптимизации технологических параметров, а также обсуждает преимущества автоматизации.

Современные исследования автогенной плавки активно фокусируются на улучшении управления тепловым режимом и повышении стабильности процесса за счет интеллектуальных систем контроля и автоматизации. Так, Мусабеков А., Бектурганов Т. и Чжан П. в работе «Fuzzy and PID control of temperature in autogenous flash smelting furnaces» исследуют использование нечетких и PID-регуляторов для поддержания оптимальной температуры ванны и равномерного распределения концентрата. Авторы демонстрируют, что внедрение таких систем позволяет снизить локальные перегревы и стабилизировать извлечение меди и золота. При этом они отмечают, что интеграция данных о химических реакциях и фазовом составе ванны пока недостаточно развита, что ограничивает комплексное управление процессом.

Bacedoni M., Rossi F. и Chen Y. в «Thermodynamic and energy balance modeling of flash smelting furnaces» [4] подробно анализируют термодинамический и энергетический баланс печей флэш-плавки. Они показывают, что корректная оценка тепловых потоков между металлом, шлаком и отходящими газами позволяет прогнозировать локальные перегревы и оптимизировать технологические параметры. Исследование отличается высокой теоретической проработкой, однако ограничено практическими испытаниями на промышленных печах, что снижает прямую применимость результатов.

Дусебекова М., Мухаметжанов К. и Serikbayev R. в работе «Analysis of copper losses in autogenous flash smelting at the Balkhash plant» [5] анализируют потери меди при автогенной плавке на Балхашском заводе. Они используют промышленные данные для оценки влияния локальных перегревов и неравномерного распределения концентрата на коэффициент извлечения металла. Результаты демонстрируют, что оптимизация подачи концентрата и дутья позволяет снизить потери меди до 2,5 %, а интеграция систем мониторинга температуры и автоматического регулирования повышает стабильность процесса.

Taskinen J. и Jokilaakso A. в «CFD modeling of multiphase flow in autogenous smelting furnaces» применяют CFD-моделирование для анализа распределения концентрата, шлака и газовой фазы в автогенных печах.

Работа показывает, что оптимизация подачи шихты и дутья позволяет минимизировать зоны локального перегрева и повышает стабильность плавки.

Аргын Б., Есимов Т. и Чжан П. в «Thermal balance calculation considering sulfide reactions in autogenous smelting» рассматривают расчет теплового баланса с учетом сульфидных реакций [6]. Авторы показывают, что повышение температуры дутья влияет на потери металла, а точный контроль теплового режима необходим для стабилизации процесса. Несмотря на теоретическую проработку, практическая проверка моделей ограничена, а интеграция с автоматизированными системами управления отсутствует.

Досмухамедов С., Ахметов Р. и Li H. в «Material and thermal flows in autogenous smelting furnaces» проводят анализ материальных и тепловых потоков. Они показывают, что контроль температуры ванны и равномерное распределение концентрата позволяют стабилизировать извлечение меди на 95 – 96 % [5].

Alexander J., Brown P. и Zhao Y. в «Environmental impact assessment of autogenous smelting processes» оценивают влияние теплового режима на экологические показатели, включая выбросы  $\text{SO}_2$  и расход топлива. Оптимизация температуры позволяет снизить выбросы и повысить энергоэффективность процесса. Работа демонстрирует высокий уровень раскрытия по экологическим аспектам, однако интеграция с химическими и фазовыми моделями ванны ограничена [7].

Zhao Y., Li X. и Chen L. в «Temperature stabilization techniques in flash smelting» рассматривают методы стабилизации температуры ванны, включая автоматизированные регуляторы и адаптивные алгоритмы. Авторы показывают, что поддержание температуры в пределах  $\pm 5$  °C снижает потери меди на 2 % и сокращает энергозатраты на 6 – 7 %.

Maghsoudizadeh F., Patel S. и Johnson K. в «4E analysis (Energy, Exergy, Environment, Economy) of autogenous smelting with integrated CFD and intelligent controllers» применяют комплексный подход, объединяющий CFD и интеллектуальные системы управления для оценки энергопотребления, выбросов, экономической эффективности и устойчивости процесса. Работа демонстрирует снижение энергозатрат на 12 – 15 % и выбросов  $\text{SO}_2$  на 18 %, что подтверждает значимость комплексного анализа [8].

Муханов А., Исмаилов Т. и Чжан П. в «Optimal control of autogenous smelting using temperature sensors and flow meters» описывают системы оптимального управления с использованием датчиков температуры и расходомеров. Авторы показывают, что такой контроль повышает стабильность процесса, снижает потери меди на 1,5 – 2 % и уменьшает энергопотребление на 5 – 6 %.

Современные исследования по управлению тепловым режимом автогенных печей также акцентируют внимание на внедрении интеллектуальных систем контроля. Федоров В.И. и Сулимов Р.А. в работе «Automation with fuzzy regulators in autogenous smelting» демонстрируют, как

использование нечетких регуляторов позволяет стабилизировать температуру ванны и оптимизировать подачу концентрата. Авторы показывают, что локальные перегревы снижаются на 12 – 15 °C, а расход топлива уменьшается на 7 %, что значительно повышает эффективность плавки. Данное исследование подчеркивает изучения и внедрения автоматизированного управления процессом, что значительно снизит так называемый «человеческий фактор».

Матркаимов Р.А. и Писарев С.А. в «Impact of automation on refractory wear and process stability» рассматривают эксплуатационные аспекты внедрения автоматизации. Работа показывает, что автоматизация способствует увеличению срока службы футеровки на 10 – 12 % и поддержанию стабильного извлечения меди на уровне 95 – 96 %. Авторы подчеркивают, что контроль теплового режима напрямую влияет на долговечность оборудования и равномерность плавки.

Ряд работ последних лет сосредоточен на стратегиях управления процессом. Kim S., Park J. и Lee H. в «Control strategies for autogenous copper smelting furnaces» исследуют влияние различных алгоритмов регулирования, включая PID и адаптивные подходы, на стабильность процесса и извлечение металлов. Авторы демонстрируют, что корректная настройка систем управления снижает потери меди и повышает производительность плавки. Эти результаты подчеркивают значимость точного регулирования температуры и подачи концентрата, одновременно показывая, что химическая интеграция моделей остается недостаточно развитой.

Моделирование теплопередачи также активно изучается. Garcia M., Lopez R. и Fernandez J. в работе «Simulation of heat transfer in flash smelting furnaces» анализируют влияние конвекции, теплопроводности и излучения на локальные температуры в ванне. Авторы показывают, что оптимизация распределения концентрата и дутья позволяет минимизировать зоны локального перегрева, что положительно сказывается на извлечении меди.

Johnson K., Patel S. и Maghsoudizadeh F. в «Energy efficiency improvement in autogenous smelting» сосредотачиваются на энергопотреблении и повышении энергоэффективности процесса. Работа демонстрирует, что оптимизация температуры дутья и подачи концентрата снижает энергозатраты и повышает стабильность плавки. Авторы отмечают, что улучшение энергоэффективности напрямую связано с уменьшением локальных перегревов и стабильностью процесса, но интеграция химических реакций в расчет энергопотребления пока ограничена.

Lee H., Kim S. и Park J. в «Adaptive control of temperature and flow in autogenous smelting» подробно анализируют адаптивные алгоритмы управления температурой и подачей концентрата. Авторы показывают, что адаптивное управление позволяет поддерживать стабильность плавки при изменении состава концентрата, снижать потери меди и повышать производительность.

Экологические аспекты также остаются в центре внимания. Chen Y., Zhao Y. и Brown P. в «Environmental monitoring in autogenous copper smelting» оценивают влияние теплового режима на выбросы  $\text{SO}_2$  и расход топлива. Авторы показывают, что оптимизация теплового режима снижает выбросы на 15 – 20 % и улучшает экологические показатели процесса [8].

Чжан П., Исмаилов Т. и Муханов А. в «Integration of sensor data for process control in flash smelting» исследуют интеграцию данных с датчиков температуры и расходомеров для улучшения контроля процесса. Авторы показывают, что мониторинг и анализ данных в реальном времени повышают стабильность плавки и снижают потери меди. В работе на высоком уровне смоделирована практическое использование систем контроля.

Patel S., Maghsoudizadeh F. и Johnson K. в «4E analysis of autogenous copper smelting» применяют комплексный подход Energy-Exergy-Environment-Economy, объединяя CFD-моделирование и интеллектуальные системы управления. Работа демонстрирует снижение энергозатрат, выбросов и повышение экономической эффективности.

Мухаметжанов К., Досмухамедов С. и Ахметов Р. в «Material flow analysis in autogenous smelting furnaces» анализируют материальные потоки концентрата и металлов, влияние теплового режима на извлечение меди и стабильность процесса. Работа подчеркивает необходимость равномерного распределения концентрата и точного контроля температуры для повышения эффективности плавки.

Изученные материалы и научные статьи имеется возможность поделить на несколько направлений:

1 Термодинамическое и энергетическое моделирование

Анализ подходов к расчету теплового баланса, локальных перегревов, оптимизация подачи концентрата и дутья.

2 Автоматизация и интеллектуальные системы управления

Влияние на стабильность процесса, локальные перегревы, энергозатраты, интеграция с химией.

3 CFD-моделирование и анализ многофазного потока

Методы моделирования, влияние на локальные перегревы, равномерность плавки, ограничения практической проверки.

4 Экологические и энергоэффективные исследования

Оценка влияния теплового режима на выбросы, энергопотребление, устойчивость процесса.

## 1.1 Термодинамическое и энергетическое моделирование

Современные исследования по термодинамическому и энергетическому моделированию автогенной плавки демонстрируют высокий уровень развития теоретических подходов и дают возможность глубоко анализировать тепловой режим печей. В работах подробно описывают распределение тепловых потоков между металлом, шлаком и отходящими газами. Авторы используют сложные термодинамические

модели, которые учитывают изменения температуры дутья, состава концентрата и интенсивности реакций сульфидов, что позволяет прогнозировать локальные перегревы и оценивать стабильность процесса. Исследование подчеркивает, что оптимизация подачи концентрата и дутья напрямую влияет на равномерность плавки и эффективность извлечения меди, снижая потери металла и минимизируя неравномерное распределение температуры в ванне. Несмотря на высокий уровень теоретической проработки, практическая проверка моделей на промышленных установках ограничена, что снижает возможность прямого применения результатов без адаптации к конкретным условиям производства. Изучение тепловых потоков и распределение концентрата, приводят к выводу, что контроль температуры ванны в пределах  $\pm 10$  °С стабилизирует извлечение меди на уровне 95 – 96 %, снижает локальные перегревы и минимизирует потери металла.

Важным аспектом исследований термодинамического направления является взаимосвязь теплового режима с химическими и фазовыми процессами, происходящими в печи. Исследователи подчеркивают необходимость учета реакций сульфидов, теплообмена между шлаком и металлом, а также динамики газового потока, тогда как казахстанские исследования фокусируются на практических показателях извлечения металлов и стабильности процесса, опираясь на реальные наблюдения и измерения температуры. Объединение этих подходов создаёт возможность для построения комплексных моделей, которые учитывают, как термодинамические и химические аспекты, так и практические условия работы печей.

Таким образом, термодинамическое и энергетическое моделирование, является ключевым направлением для понимания и оптимизации автогенной плавки. Высокая степень изученности в теоретической части сочетается с практическими проверками, что позволяет формировать рекомендации для реальных промышленных условий. Проблемы остаются в интеграции автоматизированных систем управления и фазового состава шлака, что открывает перспективы для будущих исследований, направленных на создание комплексных моделей управления процессом.

## 1.2 Автоматизация и интеллектуальные системы управления

Автоматизация и внедрение интеллектуальных систем управления являются одним из ключевых направлений в совершенствовании автогенной плавки. Современные технологии позволяют не только стабилизировать тепловой режим печей, но и минимизировать локальные перегревы, снизить потери металлов и оптимизировать расход топлива. Исследования активно

исследуют применение PID-регуляторов, нечетких систем управления и адаптивных алгоритмов для повышения эффективности процесса. Федоров В.И. и Сулимов Р.А. в «Automation with fuzzy regulators in autogenous smelting» отмечают, что автоматизация процесса способствует значительному снижению колебаний температуры и увеличению стабильности извлечения меди и золота. Они показывают, что использование интеллектуальных регуляторов позволяет уменьшить энергозатраты на 5 – 7 % и снизить выбросы, одновременно повышая надежность оборудования. Несмотря на высокий уровень практической значимости, авторы указывают на недостаточную интеграцию данных о фазовом составе шлака и химических реакциях, что ограничивает возможность комплексного управления процессом.

Мусабеков А., Бектурганов Т. и Чжан П. в работе «Fuzzy and PID control of temperature in autogenous flash smelting furnaces» демонстрируют, что комбинированные системы управления позволяют удерживать температуру ванны в оптимальном диапазоне, снижая локальные перегревы на 10 – 15 °C. Авторы подчеркивают, что интеграция нечетких регуляторов с традиционными PID-алгоритмами повышает устойчивость процесса при изменении состава концентрата и нагрузок печи, что особенно важно для промышленных условий с переменной шихтой. Мусабеков А. и Бектурганов Т. (2025) в исследованиях на Балхашском медеплавильном заводе интегрируют интеллектуальные системы управления с реальными промышленными данными. Они показывают, что автоматизированный контроль температуры ванны и подачи концентрата позволяет стабилизировать извлечение меди на уровне 95 – 96 %, снизить локальные перегревы и оптимизировать расход топлива. Применение адаптивных регуляторов обеспечивает устойчивость процесса при изменении состава концентрата, что подтверждает важность интеграции теории и практики в казахстанских исследованиях.

Patel S., Maghsoudizadeh F. и Johnson K. в работе «4E analysis (Energy, Exergy, Environment, Economy) of autogenous smelting with integrated CFD and intelligent controllers» объединяют интеллектуальные системы управления с CFD-моделированием и анализом энергопотребления. Авторы показывают, что комплексная автоматизация позволяет снизить энергозатраты на 12 – 15 %, уменьшить потери меди и золота, а также повысить экологические показатели за счет снижения выбросов SO<sub>2</sub> на 18 %. Данная работа демонстрирует высокую степень изученности и успешное сочетание различных подходов, однако интеграция химических моделей фазового состава шлака остается частичной.

Важным аспектом является то, что автоматизация тесно связана с температурными режимами и динамикой подачи концентрата. Исследователи показывают, что автоматизация позволяет минимизировать человеческий фактор, уменьшить ошибки при регулировании дутья и концентрата, а также повысить устойчивость процесса при колебаниях

состава шихты. Их работы, выполненные на промышленных установках, демонстрируют практическую значимость автоматизации, обеспечивая стабильность извлечения меди и долговечность футеровки.

Сравнительный анализ международных и казахстанских подходов показывает, что оба направления сосредоточены на повышении стабильности процесса и снижении потерь металлов. Международные исследования акцентируют внимание на развитии алгоритмов, моделировании и интеграции с CFD, что позволяет создавать универсальные методики управления, применимые к различным печам. Казахстанская школа, напротив, интегрирует теоретические разработки с реальными промышленными данными, что обеспечивает практическую применимость решений в условиях конкретного предприятия.

Таким образом, автоматизация и интеллектуальные системы управления, рассматриваемые через призму международных исследований и казахстанской школы, являются ключевым направлением для повышения эффективности автогенной плавки. Объединение теоретических подходов с практическими данными позволяет формировать рекомендации для оптимизации технологических процессов, снижать потери металлов, уменьшать энергозатраты и повышать устойчивость работы оборудования.

### **1.3 CFD-моделирование и анализ многофазного потока**

CFD-моделирование и анализ многофазного потока в автогенных печах являются важным инструментом для понимания распределения концентрата, шлака и газовой фазы, а также прогнозирования локальных перегревов и стабильности плавки. Исследования последних лет демонстрируют значительный прогресс в использовании вычислительных методов для оптимизации процесса. Taskinen J. и Jokilaakso A. в работе «CFD modeling of multiphase flow in autogenous smelting furnaces» описывают методы численного моделирования, позволяющие проследить движение концентрата и шлака в ванне, а также прогнозировать локальные температурные аномалии. Авторы показывают, что оптимизация подачи шихты и дутья, основанная на результатах моделирования, снижает зоны перегрева и повышает равномерность плавки, что положительно влияет на извлечение металлов.

Чжан П., Исмаилов Т. и Муханов А. в работе «Integration of sensor data for process control in flash smelting» демонстрируют интеграцию CFD-моделей с данными реального времени, получаемыми с датчиков температуры и расходомеров. Использование этих данных позволяет корректировать подачу концентрата и интенсивность дутья в режиме онлайн, что повышает стабильность процесса и снижает потери меди. Авторы подчеркивают, что сочетание CFD-моделирования и интеллектуальных систем управления

открывает новые возможности для прогнозирования поведения ванны и управления тепловыми потоками.

Используя методы CFD и анализа потоков для повышения эффективности автогенной плавки. Досмухамедов С., Ахметов Р. и Дуисебекова М. в «Material and thermal flow analysis in autogenous smelting furnaces» [9] рассматривают распределение концентрата и шлака в промышленных условиях на Балхашском медеплавильном заводе. Они показывают, что правильное распределение шихты и оптимизация интенсивности дутья уменьшают локальные перегревы, повышают равномерность плавки и стабилизируют извлечение меди. Особое внимание уделяется практическим аспектам: результаты CFD-моделирования сопоставляются с измерениями температуры и наблюдением за фазовым составом ванны, что повышает достоверность прогнозов.

Мухаметжанов К., Serikbayev R. и Дуисебекова М. в «Analysis of multi-phase flow and temperature distribution in autogenous furnaces» подробно рассматривают влияние подачи концентрата на формирование локальных зон перегрева. Они показывают, что даже небольшие изменения в распределении шихты могут вызвать существенные колебания температуры в отдельных зонах ванны, что напрямую влияет на извлечение меди и долговечность футеровки. Это исследование подчеркивает необходимость интеграции CFD-моделирования с системами автоматического контроля для обеспечения стабильного процесса.

Важно отметить, что CFD-моделирование тесно связано с другими направлениями: термодинамическим моделированием, автоматизацией и интеллектуальными системами управления. Исследования показывают, что оптимизация распределения тепла через моделирование потоков концентрата и газа снижает локальные перегревы, что положительно влияет на извлечение меди.

При этом исследователи отмечают, что практическая проверка моделей требует длительных промышленных испытаний, что не всегда возможно из-за технологических ограничений и экономических факторов.

Таким образом, CFD-моделирование и анализ многофазного потока являются ключевыми инструментами для оптимизации автогенной плавки, позволяя понять распределение концентрата, шлака и газа в печи, прогнозировать локальные перегревы и повышать стабильность процесса.

## 1.4 Экологические и энергоэффективные исследования

Экологические и энергоэффективные аспекты автогенной плавки привлекают внимание исследователей по всему миру, поскольку оптимизация теплового режима и управление процессом напрямую влияют на расход топлива, выбросы вредных веществ и экономическую эффективность производства. Johnson K., Patel S. и Maghsoudizadeh F. в

работе «Environmental impact assessment of autogenous smelting processes» акцентируют внимание на снижении выбросов  $\text{SO}_2$  и сокращении энергозатрат при оптимизации теплового режима ванны. Авторы показывают, что поддержание температуры в пределах рекомендуемого диапазона позволяет уменьшить потребление топлива на 6 – 8 % и сократить выбросы на 10 – 12 %, что подтверждает значимость интеграции экологических и энергетических аспектов при управлении процессом [8].

Chen Y., Zhao Y. и Brown P. в «Temperature stabilization techniques in flash smelting» исследуют влияние автоматизированного контроля температуры на энергоэффективность. Они показывают, что поддержание стабильного теплового режима снижает потери меди на 2 – 3 % и сокращает расход электроэнергии и топлива, одновременно улучшая экологические показатели. В работе подчеркивается, что интеграция интеллектуальных систем управления и термодинамического контроля позволяет не только повысить эффективность извлечения металла, но и уменьшить нагрузку на окружающую среду.

Практические данные показывают, что энергозатраты можно уменьшить на 5 – 7 %, а выбросы  $\text{SO}_2$  – на 8 – 10 %, при этом извлечение меди сохраняется на высоком уровне.

Досмухамедов С., Кенжалинов Б. и Дуйсебекова М. в «Energy efficiency and emissions control in autogenous smelting at Balkhash plant» показывают, что сочетание практических измерений температуры, распределения шихты и анализа выбросов позволяет выявлять узкие места и корректировать режимы работы печи, что позволяет влиять на экологию [10].

Таким образом, направление экологических и энергоэффективных исследований в автогенной плавке является критически важным для комплексного управления процессом. Исследования предоставляют методологическую основу и инструменты оценки, и подтверждает практическую значимость предложенных решений и демонстрирует их успешное внедрение на промышленных предприятиях. Это позволяет формировать рекомендации для снижения энергозатрат, уменьшения выбросов, повышения извлечения металлов и устойчивости работы оборудования, создавая основу для комплексного подхода к оптимизации автогенной плавки.

### **Выводы по разделу 1:**

1 Выявлены значительные достижения и направления исследований в области автогенной плавки. В ходе анализа работ исследователей стало очевидно, что термодинамическое и энергетическое моделирование, автоматизация и интеллектуальные системы управления, CFD-моделирование, а также экологические и энергоэффективные исследования формируют комплексную картину современного состояния науки и практики;

2 Термодинамические и энергетические направления предоставляют универсальные методологические инструменты для расчета теплового

баланса и прогнозирования локальных перегревов. Их модели позволяют учитывать состав концентрата, интенсивность реакций сульфидов, динамику дутья и теплообмен между металлом, шлаком и газовой фазой. Однако практическая проверка этих моделей ограничена пилотными установками и лабораторными экспериментами, что снижает возможность прямого применения на промышленных предприятиях.

3 Исследователи на примере Балхашского медеплавильного завода демонстрируют, как интеграция теоретических моделей с реальными измерениями температуры, распределения концентрата и контроля дутья позволяет оптимизировать тепловой режим, минимизировать локальные перегревы и снизить потери меди. Практическая проверка моделей на действующих промышленных циклах делает опыт исследователей уникальным и особенно ценным для мировой практики

4 Автоматизация и интеллектуальные системы управления – показало свою ключевую значимость для повышения стабильности процесса. Исследования демонстрируют эффективность PID-регуляторов, нечетких и адаптивных алгоритмов в удержании температуры ванны и оптимизации подачи концентрата и подтверждает эти выводы на практике, внедряя системы автоматического контроля на промышленных печах. Практическая значимость работы казахстанских исследователей заключается в обеспечении устойчивости процесса при колебаниях состава концентрата и изменении нагрузок, а также в снижении расхода топлива и уменьшении потерь металла.

5 CFD-моделирование и анализ многофазного потока – предоставляет инструменты для понимания распределения концентрата, шлака и газа в печи. Исследования развивают численные методы, позволяющие прогнозировать локальные перегревы и оптимизировать равномерность плавки и демонстрирует применение CFD-моделей на промышленных печах, что позволяет адаптировать теоретические результаты к реальным условиям и выявлять практические ограничения. Таким образом, CFD-моделирование становится связующим звеном между термодинамическим анализом и автоматизацией, обеспечивая основу для комплексного управления процессом.

6 Несмотря на высокий уровень изученности, сохраняются определенные пробелы и направления для дальнейших исследований. В первую очередь, это интеграция фазовых и химических моделей с автоматизацией и CFD, что позволит создавать более точные и универсальные прогнозные системы. Во-вторых, требуется долгосрочная проверка комплексных моделей в реальных промышленных условиях для оценки устойчивости и долговременной эффективности. В-третьих, необходимо расширение международного сотрудничества и обмен практическими данными, чтобы разработанные методики могли применяться на различных предприятиях с разным сырьем и технологическими особенностями.

7 Обобщение литературного обзора показывает, что современная наука по автогенной плавке достигла значительного прогресса. Комбинация теоретических моделей и практического опыта создаёт базу для комплексного управления процессом, обеспечивая оптимизацию теплового режима, повышение извлечения металлов, снижение энергозатрат и минимизацию воздействия на окружающую среду.

## **2 Экспериментальная часть**

### **2.1   Объекты исследования**

Опытно-промышленные испытания по использованию угля класса «орешек» и полуантрацита в процессе плавки медного сырья в печах Ванюкова на БМЗ проводились на плавильном агрегате ПВ-2 Балхашского медеплавильного завода с целью изучения возможности восполнения недостающего тепла. Промышленные испытания проводились в период с 31.05-2025-8.06.2025 года.

Испытания проводились в Медеплавильном цеху (далее МПЦ) и Балхашского медеплавильного завода (далее БМЗ).

Цель испытаний – определение возможностей использования угля класса «орешек» и антрацита для компенсации дефицита тепла (без использования других видов топлива, в том числе, мазута) и его влияние на основные параметры процесса плавки медного сульфидного сырья в печи Ванюкова.

Испытания проводились в два этапа, на первом этапе использовался каменный уголь «Комир Тау», на втором антрацит «Южный Кузбасс».

По результатам испытаний отмечено, что:

1 Уголь и антрацит возможно использовать для замыкания теплового баланса Печи Ванюкова

2 Для обеспечения более полного сгорания угля рекомендуется оптимизировать условия перемешивания расплава в печи путем уменьшения высоты надфурменной зоны (в расчете на спокойную ванну) до ~0,5-0,6 м и распределения дутья по всей длине печи. Повышению эффективности использования угля способствует также более равномерная по всей надфурменной зоне подача дутья в расплав

3 Антрацит «Южный Кузбасс» несмотря на удовлетворительные технологические показатели не может быть рассмотрен в качестве постоянного поставщика из-за высокой стоимости

4 Уголь «Комир Тау» имеет повышенную измельчаемость при транспортировании от места выгрузки до печи, около 30%. Отмечено, что при повышенной загрузке 2-3 т/ч угля «Комир Тау» наблюдалось отложение пыли в котле-утилизаторе.

### **2.2   Период испытаний**

#### **2.2.1   Расход и состав шихты**

Для проведения испытаний были заложены два одинаковых (в пределах определенной погрешности) штабеля по содержанию основных компонентов (Cu, Fe, S, SiO<sub>2</sub>). После закладки и анализа состава шихты в

штабелях специалистами проведены технологические расчеты для уточнения параметров плавки в соответствии с фактическим составом шихты в заложенных штабелях.

Средняя производительность по шихте за весь период испытаний (за вычетом аварийного простоя длительностью 10 часов из-за свища в котле-утилизаторе 1.06 в 23:15) составила 85,4 тонн в час. На первом этапе испытаний средняя производительность по шихте составила 85,6, а на втором этапе (с антрацитом «Южный Кузбасс») 85,1 т/ч. График изменения производительности печи во времени приведен на рисунке 1.

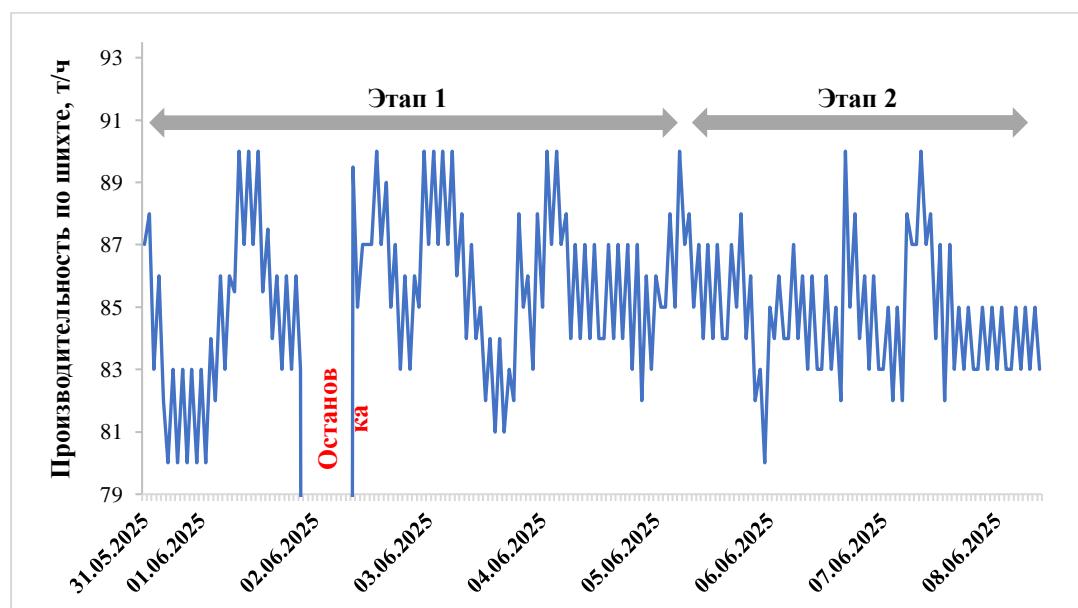


Рисунок 1 – График изменения производительности печи по шихте

Из рисунка видно, что наблюдаются колебания расхода шихты от ~80 до ~ 90 т/ч. При чем, изменение производительности на 7-9 т/ч иногда происходит в течение примерено одной смены, что, вообще говоря, нежелательно, поскольку для стабильности технологических режимов и показателей процесса изменение производительности должно сопровождаться соответствующими изменениями других входных параметров – расходов дутья, топлива, флюсов.

Таблица 1 – Средневзвешенный состав шихты в период испытаний (в % на сухую массу)

Cu	SiO <sub>2</sub>	S	Fe
19,2	10,5	30,6	26,5

Если этого не делать, основные показатели плавки (температура, состав шлака и штейна) также будут изменяться и отклоняются от требуемых значений, что, в конечном счете, ведет к перерасходу ресурсов. Средний состав шихты представлен в таблице № 1. На рисунке 2 представлено изменение содержания основных компонентов в шихте в период испытаний.

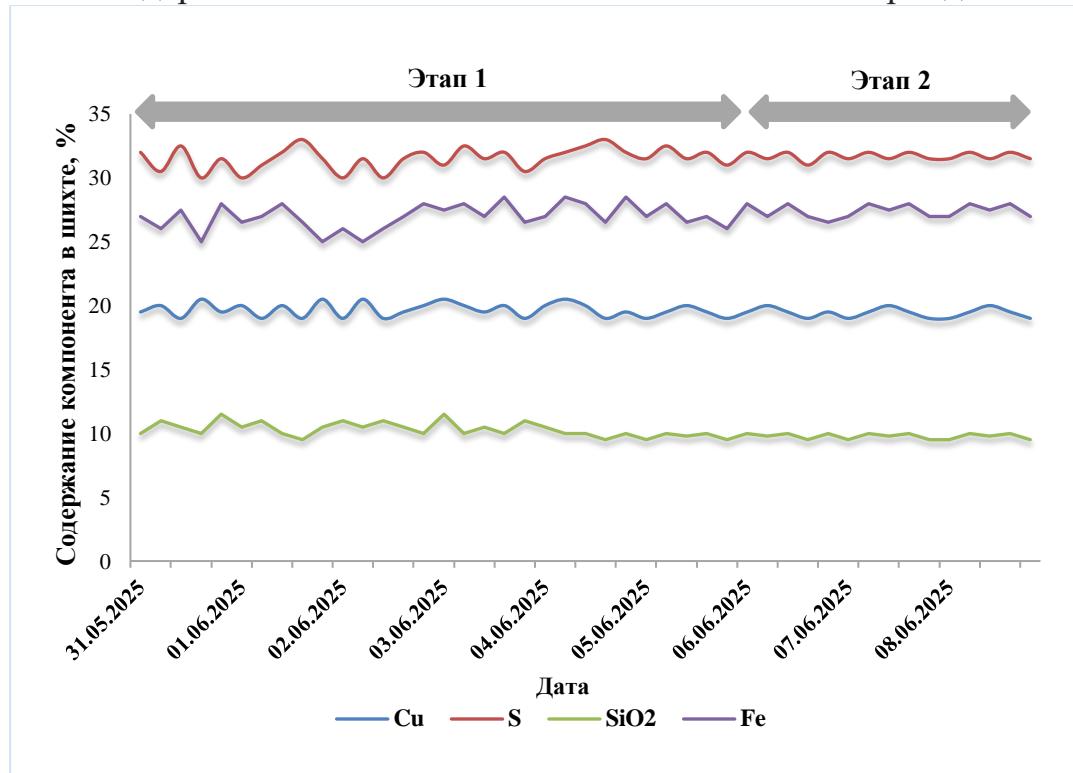


Рисунок 2 – Изменение содержания основных компонентов в шихте в период испытаний

Как видно из данных на рисунке 2 в целом состав шихты был относительно стабильным в период испытаний.

### 2.2.2 Расход угля

На первом этапе было израсходовано 243 тонны каменного угля за 129 часов работы, второй этап длился 79 часов, количество антрацита, которое было загружено в печь, составило 113 тонн. На рисунке 3 приведен временной график изменения расхода угля.

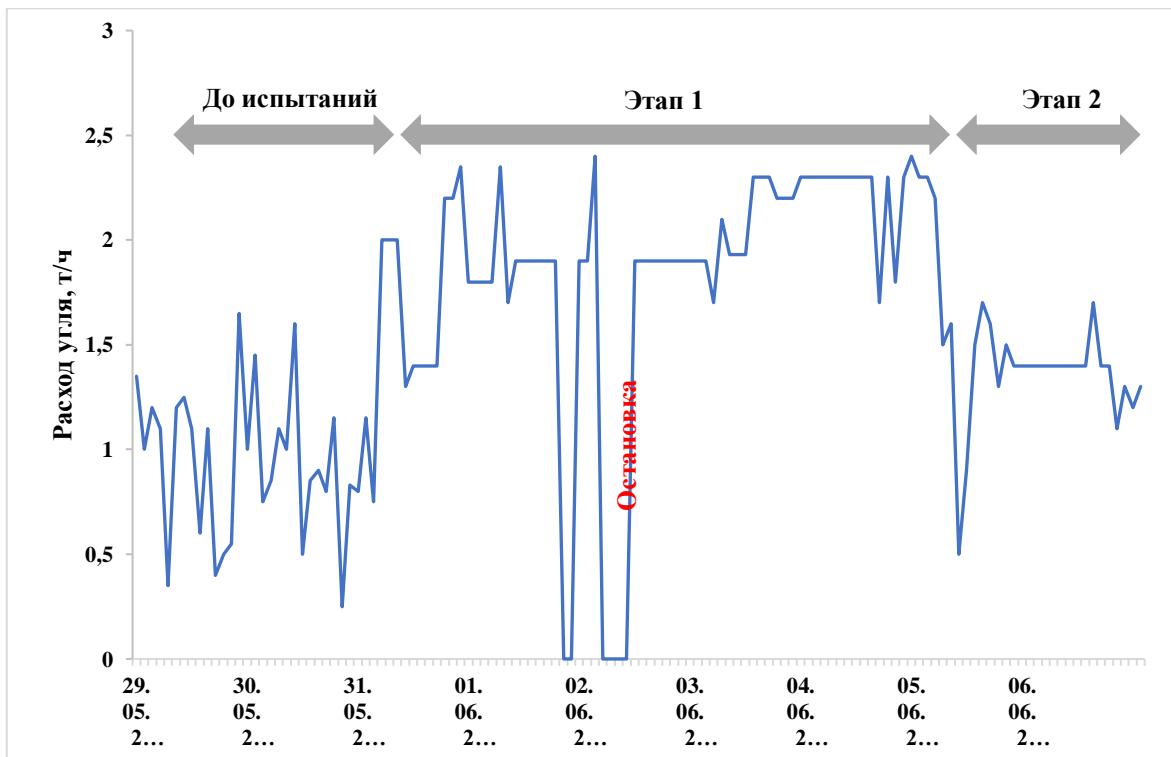


Рисунок 3 – Изменение расхода угля в период испытаний и 2 суток до испытаний

Средний расход угля до испытаний составлял около 0,9 т/ч, что более чем в два раза меньше, чем расход угля «Комир Тау» (в среднем 2,09 т/ч) на первом этапе испытаний, что связано с тем, что в текущих режимах плавки в качестве топлива для регулирования теплового баланса печи используется как каменный уголь, так и мазут, сжигаемый в МНУ. В период испытаний мазутные горелки были отключены, и тепловой режим плавки в соответствии с основной целью испытаний регулировался только расходом угля, за исключением нескольких часов, когда использовались и мазутные горелки для вывода теплового режима печи на требуемый уровень после длительного простоя. Кроме того, следует отметить значительные и достаточно резкие колебания расхода угля (от 0,5 до 1 т/ч) в текущих режимах плавки (до испытаний), что, возможно, связано с погрешностями из-за некорректно работающего весоизмерительного оборудования его регистрации в PI System, откуда были взяты эти данные. Данные по расходу угля в период испытаний фиксировались в журнале оператора, и именно эти данные использовались в представленном анализе.

Средний расход угля «Комир Тау» в первый период испытаний (за исключением короткого периода с включенными мазутными горелками, см. выше) составил около 2,09 т/ч. Средний расход антрацита («Южный Кузбасс») (на втором этапе испытаний) получился закономерно более низким, учитывая более высокую теплотворную способность антрацита по сравнению с углем «Комир Тау», и составил 1,45 т/ч.

### 2.2.3 Паропроизводительность котла-утилизатора

Несмотря на относительно высокий (по сравнению с текущими режимами) расход угля в период испытаний, паросъём котла-утилизатора практически не изменился. На рисунке 4 представлены данные до и во время испытаний.

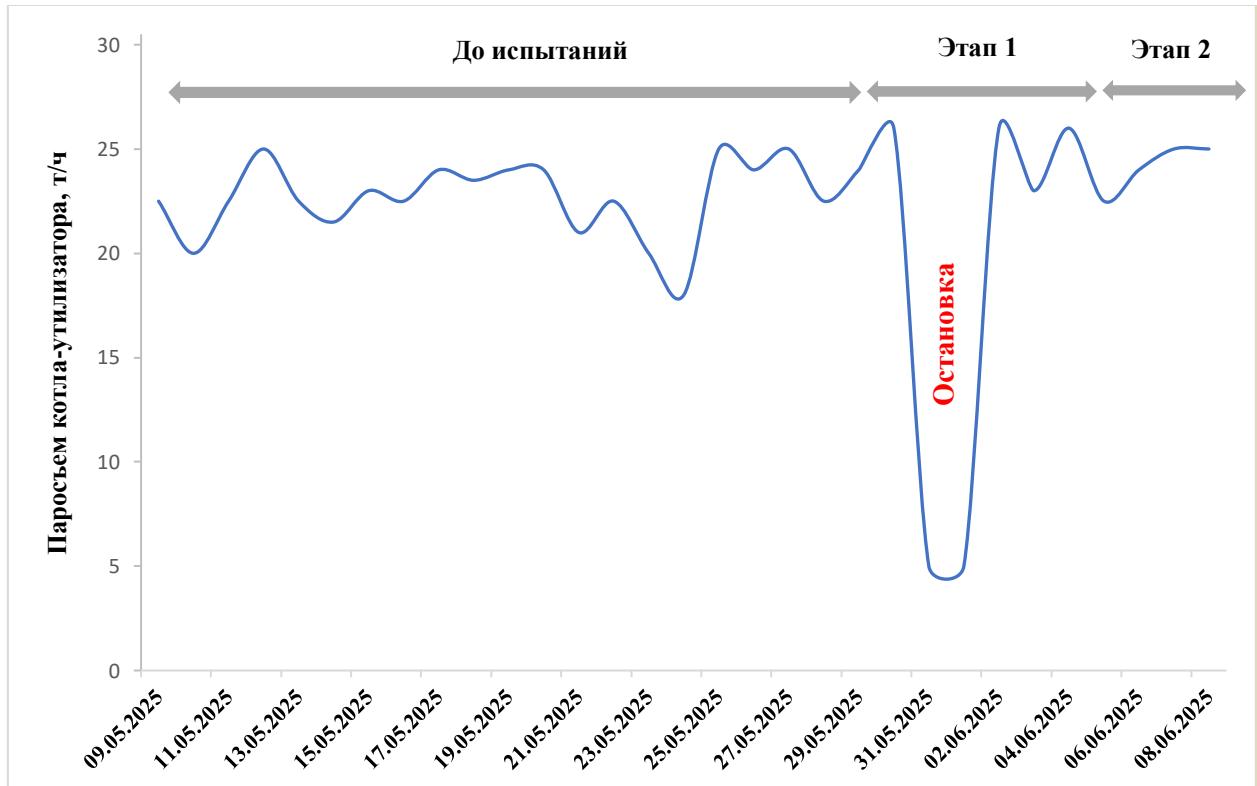


Рисунок 4 – Паросъём котла-утилизатора до и во время испытаний

### 2.2.4 Настылеобразование на воротнике котла-утилизатора

Склонность к настылеобразованию на воротнике котла-утилизатора была зафиксирована после проведения первого периода испытаний (1,2 этапы), на рисунке 5 изображен переход из аптеяка в радиационную часть котла-утилизатора сразу после проведения испытаний.



Рисунок 5 – Переход из аптеяка в радиационную часть КУ после первого периода испытаний

## 2.2.5 Температурный режим

Данные по температуре на воротнике котла-утилизатора и на выходе из конвективной части в период испытаний при использовании каменного угля «Комир Тау» (этап 1) и антрацита («Южный Кузбасс») (этап 2) представлены на рисунке 6, 7 соответственно. Максимальное кол-во ГИО в смену за 1 и 2 этап (3 и 2) соответственно.

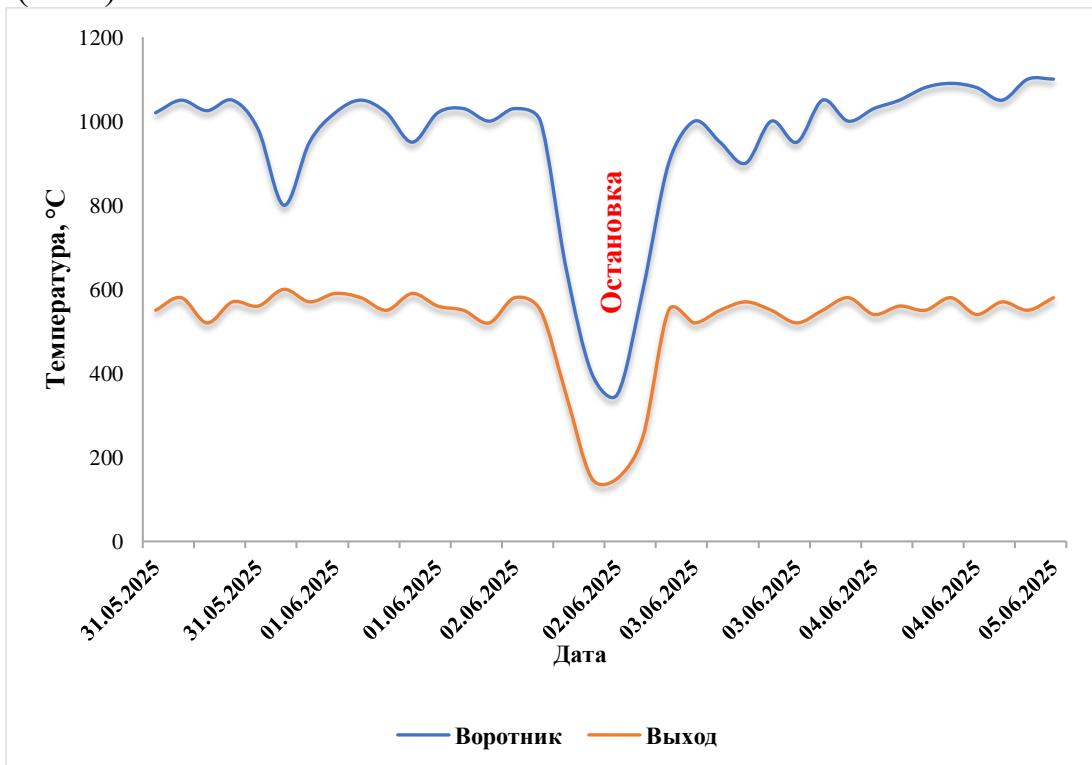


Рисунок 6 – Изменение температуры на воротнике и на выходе из КУ на этапе 1

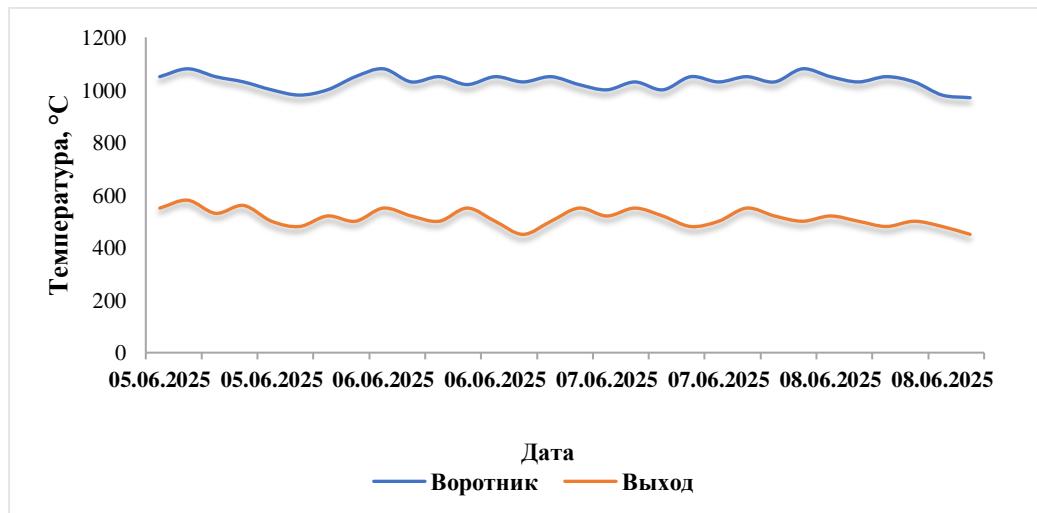


Рисунок 7 – Изменение температуры на воротнике и на выходе из КУ на этапе 2

Поддержание стабильного и оптимального температурного режима является важнейшим условием эффективности пирометаллургического процесса. Практически на всех промышленных печах Ванюкова в настоящее время температурный ход плавки оценивают на основе данных по динамике разности между температурой сливной и напорной воды на охлаждение кессонов ( $\Delta t$ ). При постоянстве состава шлака, условий перемешивания и расхода воды на охлаждение динамика величины  $\Delta t$  действительно отражает динамику температуры расплава в реакционной зоне, но абсолютное значение ее по величине  $\Delta t$  оценить невозможно. Несколько лучше ориентироваться на суммарный теплосъем с печи, поскольку он не зависит хотя бы от расхода воды на охлаждение. Хотя и по величине теплосъема невозможно оценить абсолютную температуру расплава печи по его динамике можно грубо (качественно) оценить и динамику температуры в печи.

На рисунке 8 приведен график изменения суммарного теплосъема кессонами печи ПВ-2 БМЗ в период проведения испытаний.

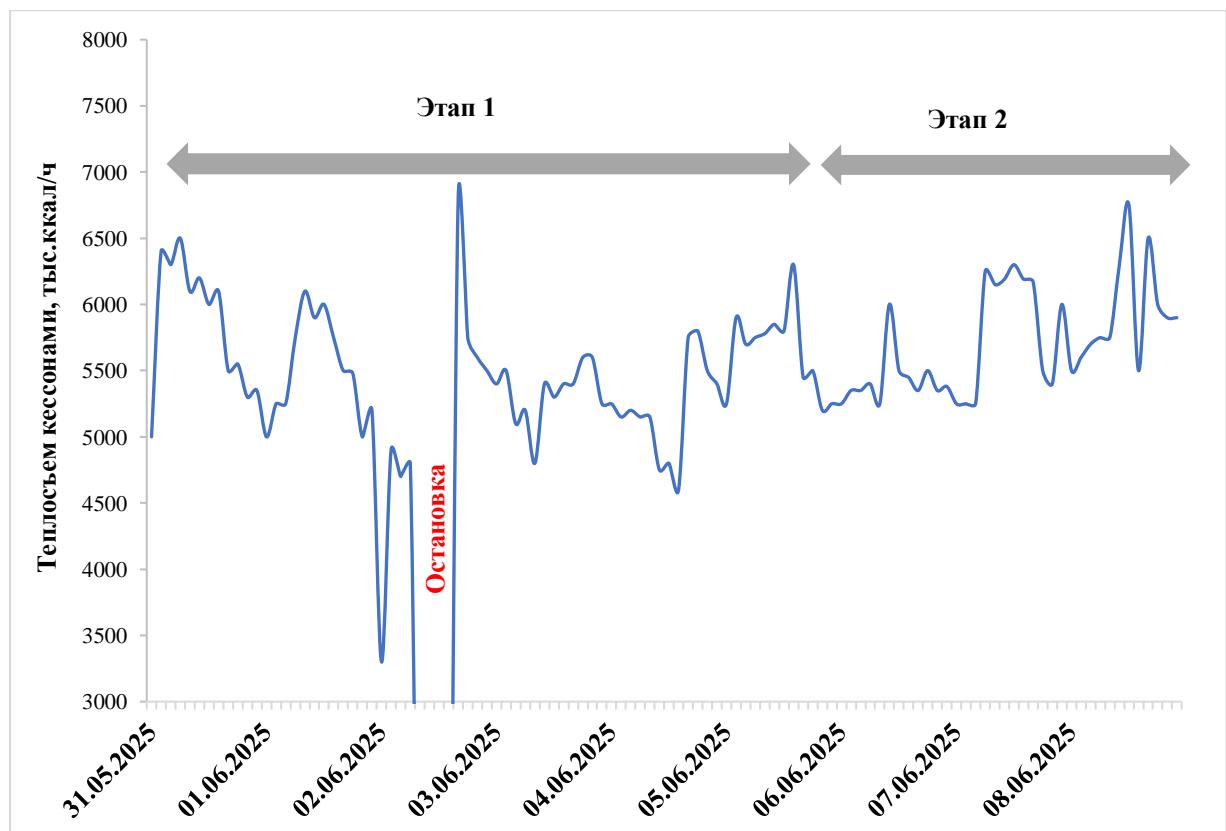


Рисунок 8 – Изменение величины суммарного теплосъема с кессонами в период проведения испытаний

Видно, что теплосъем с печи достаточно существенно меняется в процессе проведения испытаний, достигая 20-30 % в течение 1-й – 2-х смен, что свидетельствует о недостаточном внимании к регулированию теплового режима плавки. На первом этапе среднее значение теплосъема составило ~

5,6 млн. ккал/ч, на втором этапе – ~5,9 млн. ккал/ч, что косвенно свидетельствует в среднем о несколько более горячем ходе печи на втором этапе. К концу второго этапа испытаний величина теплосъема росла и увеличивалась до ~ 6,5 млн. ккал/ч, что на 10 % больше среднего значения на этом этапе. Отслеживание динамики температурного режима, его регулирование и стабилизация является важным моментом в вопросе управления технологическим процессом, но еще более важным является поддержание температуры плавки в оптимальном диапазоне, что невозможно без получения корректных данных о величине температуры расплава в печи. Как показывает опыт, прямые непрерывные измерения температуры шлака в барботируемой зоне печи с помощью термопар практически невозможны, поскольку, из-за высокой агрессивности железосиликатного шлака, особенно в условиях интенсивного перемешивания, невозможно подобрать защитный чехол для термопар, который смог бы прослужить сколько-нибудь разумное время в этих условиях. Поэтому для прямых измерений был выбран пирометрический способ измерения температуры расплава в печи. Специалистами БМЗ было выбрано место и установлен пирометр для измерения температуры расплава в печи через хвостовую течку. Данные пирометра были выведены на монитор оператора и записывались в систему сбора информации PI System. На рисунке 9 приведен график изменения температуры в печи по данным пирометра, установленного в хвостовой течке из PI System, (рис. 9) и из журнала оператора (рис. 10).

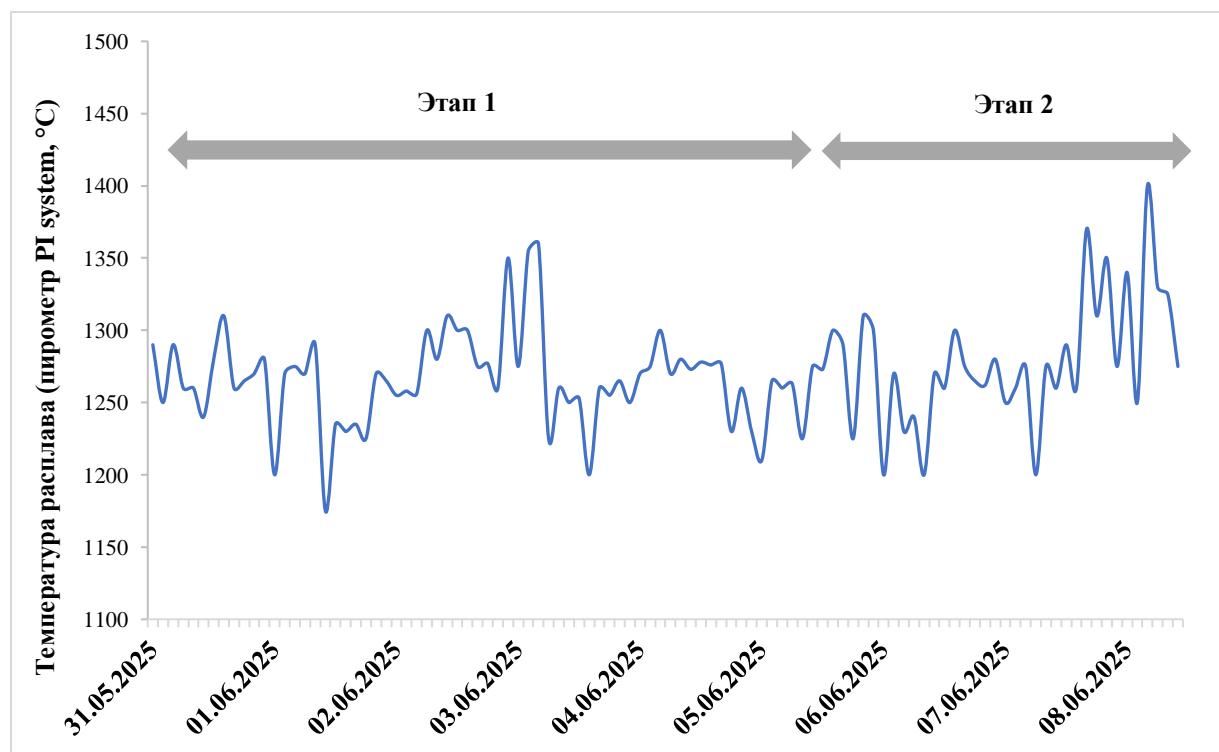


Рисунок 9 – Изменение температуры расплава (пирометр PI System, °C) в первый период испытаний

Различия в этих данных в том, что в PI System записываются среднечасовые показания, а в журнал оператора заносились мгновенные показания пирометра каждый час. Из показаний пирометра удалены точки для периодов простоев и явно неверных результатов, связанных, например, с застанием течки и перекрытием, таким образом, зоны видимости расплава в печи для пирометра. Как видно из приведенных данных температура в печи по показаниям пирометра достаточно существенно менялась во времени, в отдельные периоды снижаясь до уровня примерно 1200 градусов цельсия или повышаясь до 1350 градусов цельсия и даже выше. Закономерно более резкие и значительные колебания отмечаются на графике для мгновенных данных их журнала (рис. 10), и более плавно ведет себя кривая для усредненных по часам значений температуры из PI System (рис. 9), хотя и для этих значений нередки “выбросы” в область слишком низких и слишком высоких температур. Сами кривые на рисунках 9 и 10 ведут себя достаточно согласовано, но в точности показания не совпадают, что естественно при сравнении мгновенных и усредненных значений показаний даже для одного и того же прибора.

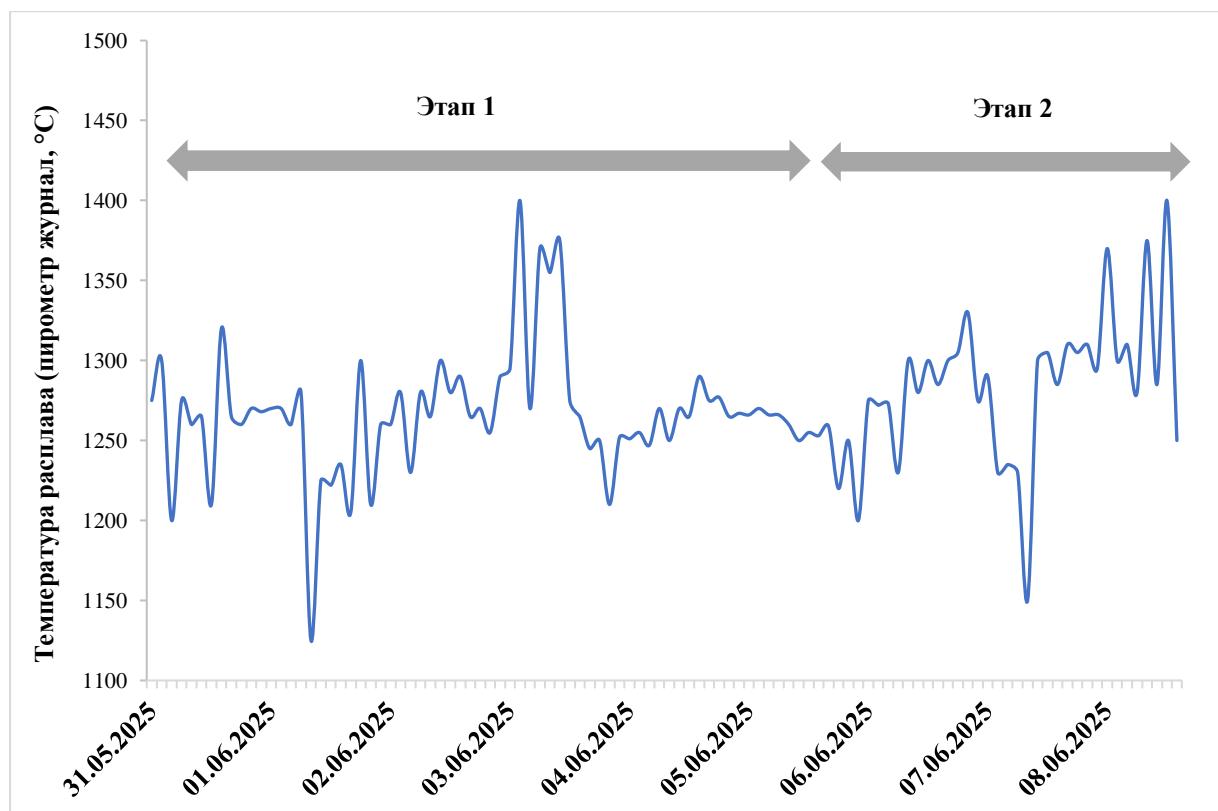


Рисунок 10 – Изменение температуры в печи по показаниям журнала оператора в первый период испытаний

Детально причины колебаний показаний пирометра и соответствие реальным температурам расплава в печи необходимо выяснить в процессе

длительных наблюдений и фиксировании всех условий и проблем в измерении температур.

Отметим некоторые ситуации, замеченные в период отладки пирометра и проведения испытаний, искажающие результаты измерений:

1 В период испытаний отмечалось нередкое зарастание течки, через которую пирометр был направлен на расплав в печи. Это зарастание может как полностью, так и частично перекрывать зону “видимости” пирометром расплава в печи и, т.о., существенно занижать измеряемую температуру расплава.

2 Была также зафиксирована и другая ситуация. При скапливании некоторого количества угля в зоне под аптееком (рисунок 12) для его сжигания подавалось дутье через одну из фурм под аптееком (в зоне скопления угля). В результате сгорания угля в небольшой локальной зоне его скопления температура в этой локальной зоне резко увеличивалась и, поскольку в эту зону сфокусирован пирометр его показания также резко возрастили, хотя в целом по ванне температура шлака практически не менялась.

Подобные ситуации желательно избегать (например, обязательно регулярно чистить течку, через которую пирометр направлен в печь), а полученные при этом показания пирометра исключить из оперативного и общего анализов.

Если говорить о средних показателях пирометрических измерений температуры через течку, то по уровню значений они вполне адекватные и в большинстве случаев эти данные укладываются в диапазон от примерно 1230 до 1300 °C. Среднее значение температуры в печи по показаниям пирометра за 1-й этап (за вычетом явно некорректных данных при забивании течки или локальном повышении температуры до 1400 °C и выше) из PI System составило 1274 °C (по данным в журнале – 1275 °C), на втором этапе (с антрацитом) средняя температура составила по данным PI System 1280 °C (по данным из журнала оператора – 1287 °C) при этом в конце второго этапа температура подросла до уровня 1300–1340 °C.

Можно также отметить, что данные прямых измерений температуры пирометром через хвостовую течку и величины общего теплосъема принципиально коррелируют между собой (рис. 11).



Рисунок 11 – Взаимосвязь между показаниями пирометра и величиной общего теплосъема кессонами в первый период испытаний

Корреляция между этими величинами свидетельствует о реальности отмеченных с помощью анализа этих величин колебаний теплового режима плавки, возможности использования этих измеряемых величин для оценки теплового режима процесса. В то же время еще раз отметить, что данные прямых измерений температуры являются более предпочтительными, поскольку не только динамика теплового режима, но и, прежде всего, абсолютные значения температуры расплава должны быть приоритетом при управлении тепловым режимом плавки. Правда, для этого необходимо повысить уровень (качество) пирометрического контроля температуры, поскольку по итогам проведенных испытаний остается ряд вопросов, которые необходимо решить:

1 Необходимо исключить перекрытие смотрового окна пирометра по любым причинам. Возможно, продумать и изменить его (окна) конструкцию.

2 Необходимо исключить влияние на показатели пирометра локальных процессов перегрева (или переохлаждения) расплава. Посмотреть возможность направить пирометр в область активного барботажа, в которой за счет перемешивания шлака происходит быстрое выравнивание температуры по объему расплава. Температура расплава в этой области наилучшим образом характеризует температуру шлака во всей реакционной (барботируемой) зоне печи.

В ходе проведения испытаний осуществлялся постоянный контроль за температурой шлака, штейна на выпуске и шлака в сифоне, сразу после

выключения мазутной форсунки. В таблице № 2 указаны средние значения по основным температурам за первый период испытаний.

Таблица 2 – Средние значения некоторых параметров первого периода испытаний

Показатель	Этап 1	Этап 2
Температура на воротнике, °C	1053	1041
Температура после котла-utiлизатора, °C	544	513
Паропроизводительность котла, т/ч	24,5	23,1
Кол-во ГИО за смену	2	2
Максимальная температура на воротнике КУ, °C	1090	1082
Минимальная температура на воротнике КУ, °C	961	990
Максимальная температура на выходе КУ, °C	606	590
Минимальная температура на выходе КУ, °C	446	455
Максимальная температура перед дымососами, °C	443	452
Минимальная температура перед дымососами, °C	309	344
Высота пены, мм	-	-
Температура штейна на выпуске, °C	1163	1155
Температура шлака на выпуске, °C	1258	1263
Температура расплава в шлаковом сифоне, °C	1268	1264
Температура по пирометру в печи, °C	1282	1271

В целом температурные показатели очень близки для двух этапов, различия очень малы (кроме, пожалуй, паропроизводительности котла) и могут быть обусловлены небольшими различиями в целом ряде других параметров – производительности по шихте, объемах дутья, объемах подсосов воздуха (что неконтролируемо) и т.п. Тем не менее, можно отметить, что на первом этапе при несколько меньшей температуре плавки температура на воротнике чуть выше, выше температура газов после котла и выше производительность котла по количеству пара. Несмотря на очень малые различия можно предположить, что они (при прочих равных условиях) обусловлены небольшими различиями в поведении угля и антрацита, связанные с различиями в свойствах этих видов угля.

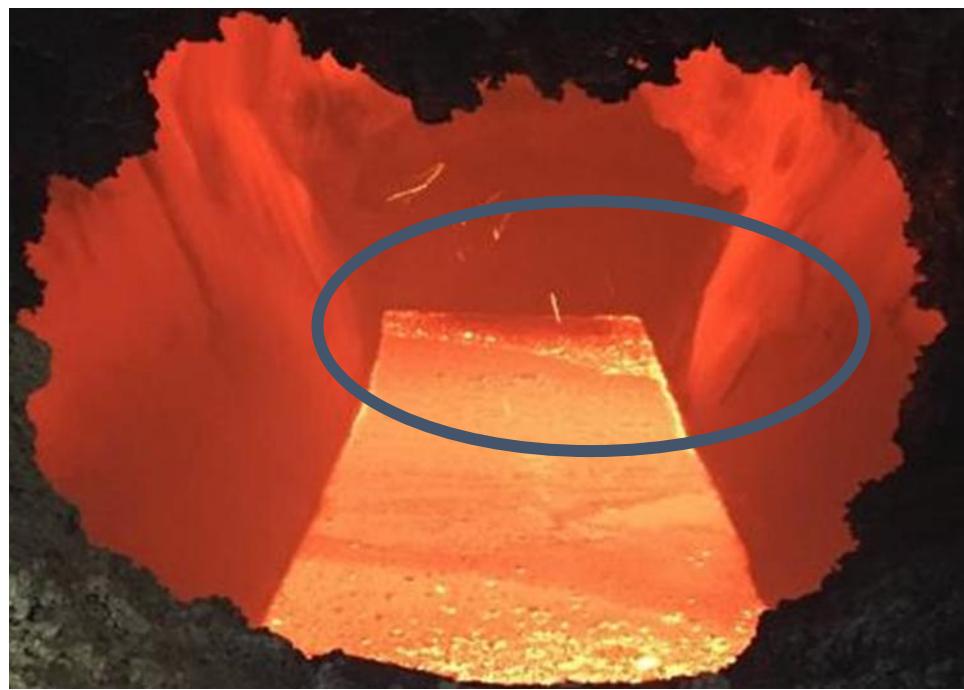


Рисунок 12 – Скопившийся уголь на поверхности шлака под аптеиком

## 2.2.6 Составы основных продуктов плавки

В данном разделе представлены рисунки (13 – 18) с содержанием основных продуктов плавки в динамике за первый период испытаний.

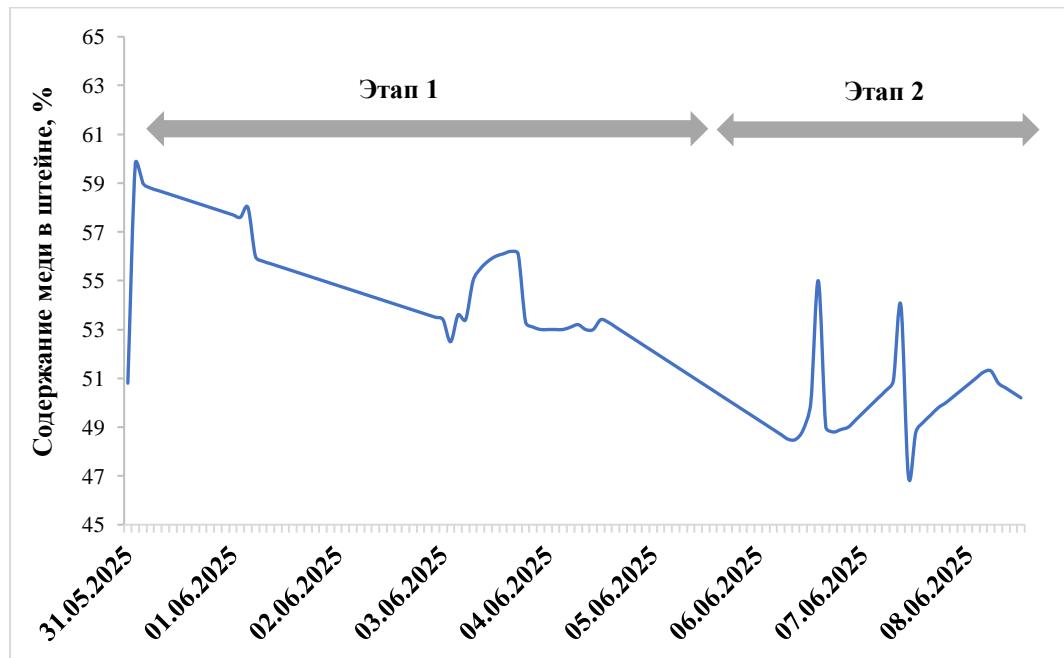


Рисунок 13 – Изменение содержания меди в штейне за первый период испытаний

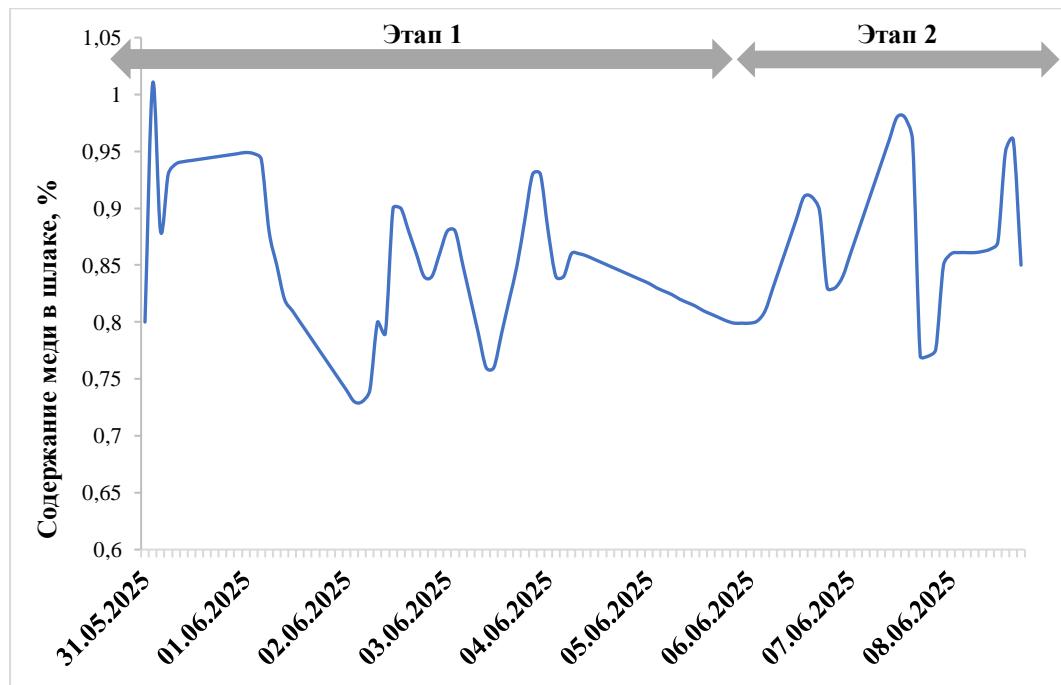


Рисунок 14 – Изменение содержания меди в шлаке за первый период испытаний

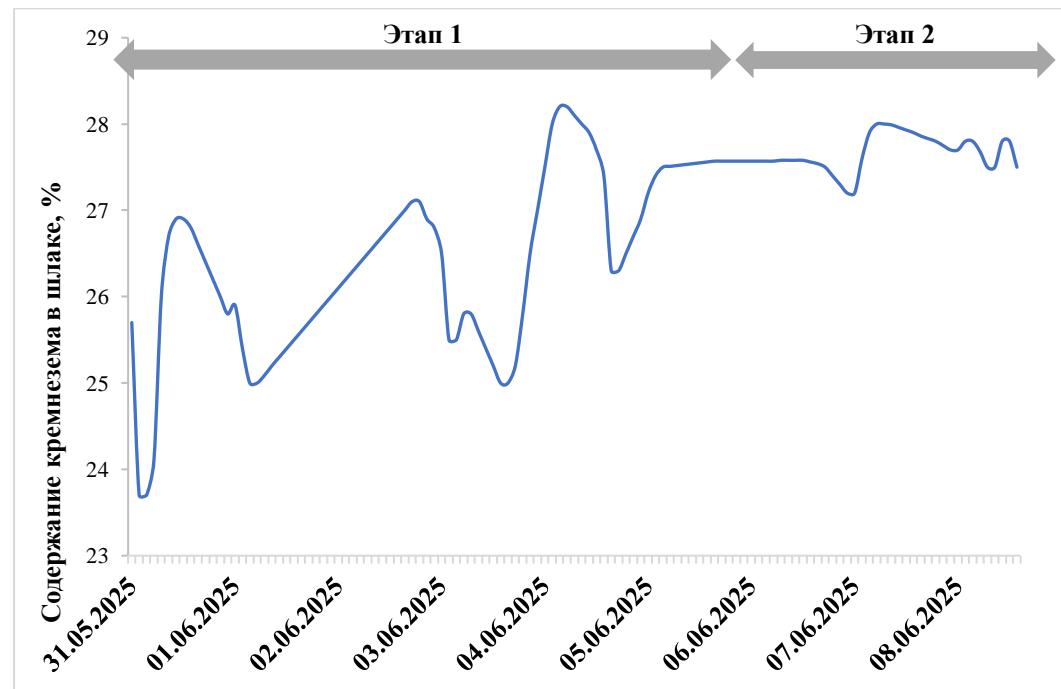


Рисунок 15 – Изменение содержания кремнезема в шлаке за первый период испытаний

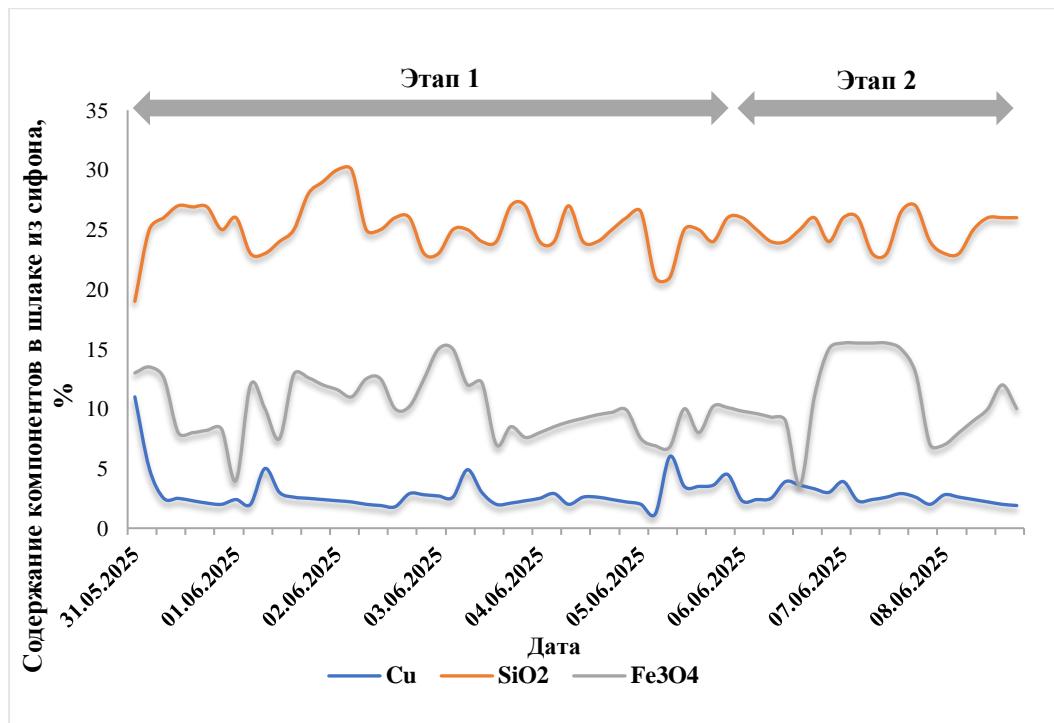


Рисунок 16 – Изменение содержания основных компонентов в шлаке из сифона в первый период испытаний

Одним из важнейших технологических параметров процесса плавки Ванюкова является содержание SiO<sub>2</sub> в шлаке, от величины которого зависят многие показатели плавки, в том числе потери меди со шлаками и стабильность процесса. На рисунке 17 представлена зависимость содержания меди в отвальных шлаках от содержания в них SiO<sub>2</sub> по данным в первый период испытаний.

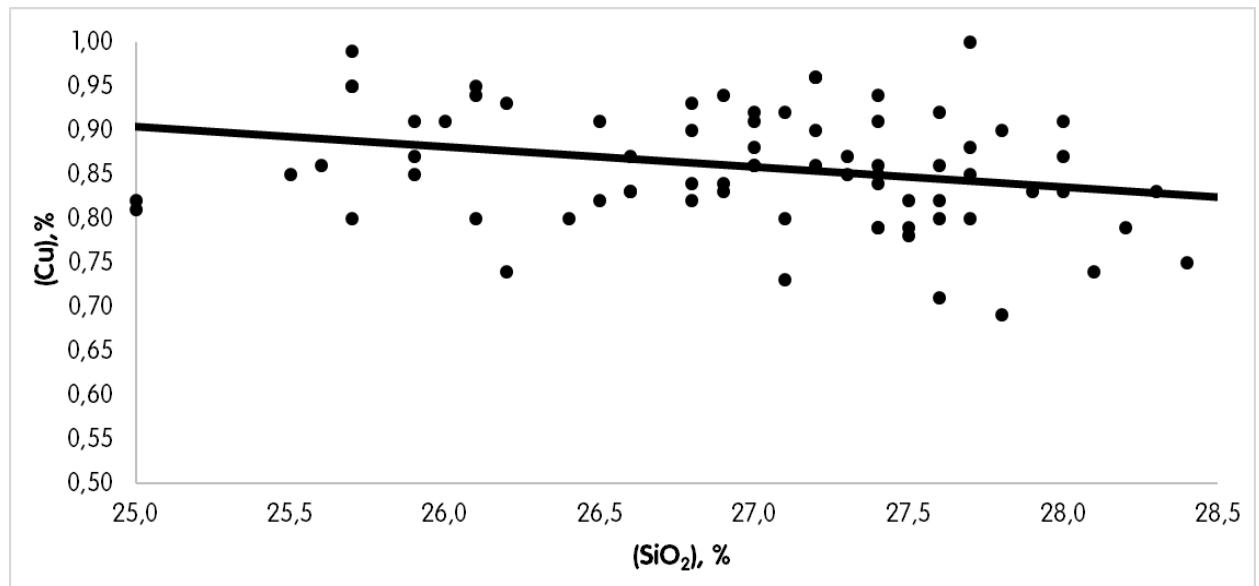


Рисунок 17 – Зависимость содержания меди в отвальных шлаках от содержания в них кремнезема

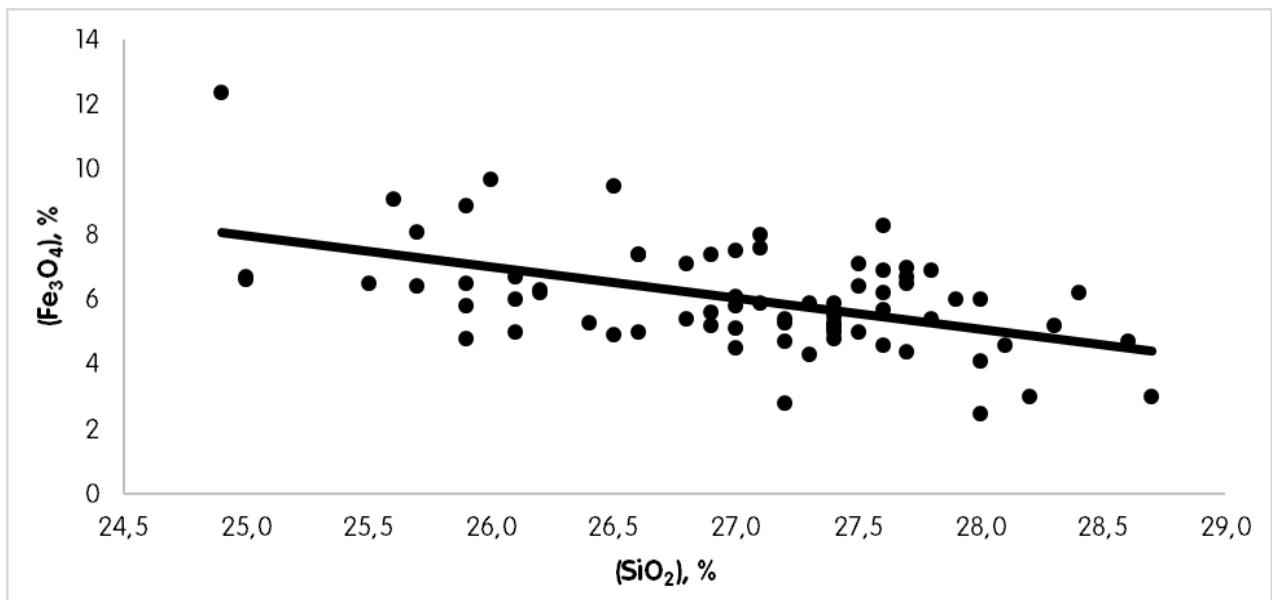


Рисунок 18 – Влияние содержания кремнезема в шлаке на содержание в нем магнетита

В ходе испытаний «грязь» с лома была отобрана для проведения анализа. Результаты анализа представлены в таблице № 3. В конце испытаний «грязь» с лома растворилась. Это произошло из-за более горячего ведения процесса в конце второго этапа испытаний. В таблице 4 представлено средневзвешенное содержание основных компонентов в продуктах плавки.

Таблица 3 – Результаты анализа «грязи» с лома

Элемент	Cu	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Fe	Zn	CaO
Содержание, %	29,5	6,5	13,1	29,2	2,1	0,3

Таблица 4 – Средневзвешенное содержание основных компонентов в продуктах плавки

Содержание элемента	Этап 1	Этап 2
Медь в штейне, %	54,20	51,20
Медь в отвальном шлаке, %	0,85	0,87
Кремнезем в отвальном шлаке, %	26,60	27,30
Медь в шлаке с перетока, %	2,90	2,50
Кремнезем в шлаке с перетока, %	25,80	26,50
Магнетит в шлаке с перетока, %	9,96	9,89

## 2.2.7 Сравнение расчетных и фактических показателей плавки

Для анализа этих результатов для усредненных характеристик проведены расчеты ПВ по факту по двум этапам испытаний, с учетом фактических условий для каждого этапа (включая величину потерь тепла с кессонами), чтобы сравнить практические и расчетные данные по расходам.

Расчеты по необходимым расходам угля и антрацита очень близки к фактическим данным. На антраците расчетная потребность составила 1,55 т/ч при среднем фактическом расходе в испытаниях 1,45 т/ч. Расход угля при пылевыносе в 1,5 % (стандартный вариант для угля) расчетное значение расхода угля «Комир Тау» составило около 1,9 т/ч при фактическом среднем значении 2,09 т/ч, т.е. чуть меньше факта. В предположении, что при высокой доле мелочи в угле «Комир Тау» (в антраците ее практически нет) вынос угля выше принятого значения), мы провели расчет с пылевыносом угля «Комир Тау» в 10,5 % (что на 10 % выше, чем принято для антрацита). Расчетная потребность угля «Комир Тау» возросла до 2,12 тонн в час, что уже чуть выше факта. С большой натяжкой можно говорить, что при большом количестве мелочи до 10 % угля может выноситься. По большому счету оба значения расчетного расхода угля можно считать близкими к фактическим данным, что свидетельствует о том, что уголь практически полностью (как минимум не менее 90 %) сгорает в ванне даже при существующих недостатках условий перемешивания шлака в реакционной зоне печи (высокая надфурменная зона, отсутствие барботажа в зоне под аптейком). Очевидно, что антрацит работает еще лучше, поскольку практически нет пыли и очень мало летучих.

Несмотря на высокую степень усвоения угля «Комир Тау» в ванне (учитывая близость расчетных и фактических значений расхода угля) приведенные в таблице 3 данные могут служить аргументом того, что на угле вынос пыли несколько выше, чем на антраците. Конечно, все отмеченные эффекты невелики, и могут быть связаны с разными причинами (например, могут быть различны подсосы воздуха и др.), но, в принципе, могут быть вызваны и догоранием пылевидной части угля или летучих углей. Оценки выше показывают, что вынос пылевидной части угля (либо пыли и несгорающих летучих, что сложно разделить в данном случае) не превышает 10-11 %, что совершенно некритично для теплового баланса печи.

Произведена оценка теплового эффекта от догорания 10 % угля (в виде пыли или летучих, все-равно) на температуры отходящих газов и возможное изменение паропроизводительности котла. Результат следующий. При увеличении пылевыноса угля на 10 % и его полном догорании в газах выделяется дополнительно около 1 Гкал тепла, что должно увеличить температуру отходящих газов примерно на 50 с лишним градусов. Учитывая, что зафиксированное повышение температуры на воротнике составило всего ~10 °C, можно предположить, что, догорание угля происходило (если происходило) большей частью в котле, что, учитывая, повышение в купе с

повышением температуры на воротнике дает увеличение паропроизводительности котла. Из дополнительных 1 Гкал тепла от сгорания пыли, около 0,5-0,6 Гкал уходит на увеличение температуры газов после котла на  $\sim 30$  °С, остальное дополнительное количество тепла, т.е. 0,4-0,5 Гкал должно сниматься в котле, что приведет к увеличению паросъема примерно на около  $\sim 1$  т/ч. В целом полученная оценка согласуется с зафиксированным приростом паросъема в 1,4 т/ч при работе на угле по сравнению с работой на антраците.

### 2.3 Полнота и корректность данных. Анализ параметров работы ПВ-2

При анализе параметров работы ПВ-2 на основании указанных выше исходных данных возникли следующие трудности:

1 Один из главных показателей, который напрямую связан с удельным расходом кислорода, и ориентируясь на который ведется управление технологическим режимом, является расход дутья КВС-1 и содержание в нем кислорода. На рисунке 19 и 20 представлены данные по сумме расходов воздуха и технологического кислорода (ТК) в КВС-1 по данным PI System и расходу общего дутья в КВС-1 также по данным PI System в первый, во второй и в третий период соответственно.

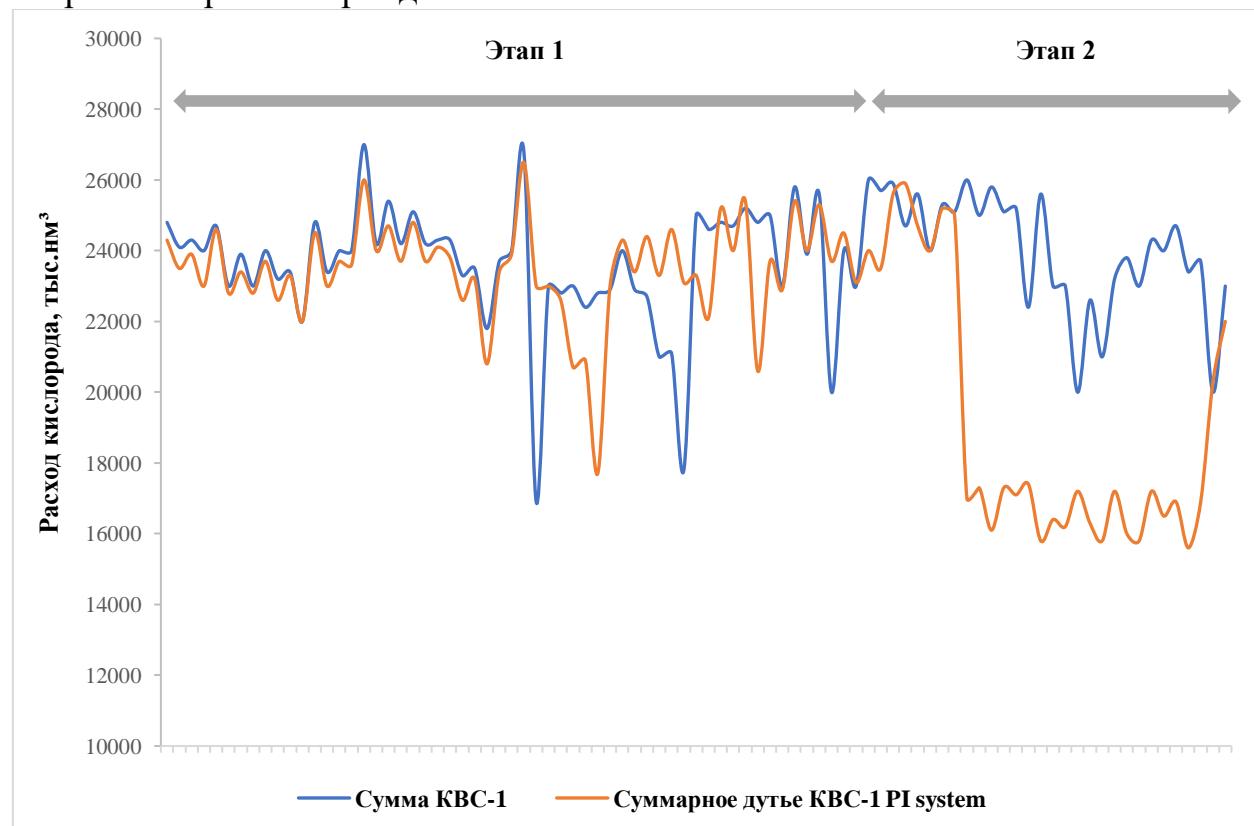


Рисунок 19 – Данные по дутью КВС-1 из PI System в период испытаний

Как видно из рисунок 19, на первом этапе невязка между этими величинами была, но (в целом) относительно, небольшая, вплоть до  $\sim 4.06.2018$  (правда, в отдельные периоды сумма измеренных расходов воздуха и технологического кислорода почему-то резко падала, становясь ниже значений измеренного расхода КВС-1 на 5-6 тыс.), а на втором периоде практически до его завершения, различия составили около 7 – 8 тыс.  $\text{м}^3/\text{ч}$ , при чем, в отличие от “провалов” на первом этапе, на втором этапе расход КВС-1 был меньше, чем сумма расходов воздуха и ТК, и только во второй половине 08.06.2018 эти значения практически сравнялись.

2 На сегодняшний день данные по МНУ, а именно расход мазута и кислорода на его горение не объединены с PI System. В связи с этим, данные могут быть выгружены исключительно в виде скриншотов архива работы МНУ, что затрудняет анализ влияния параметра на тепловой ход печи.

3 Показатель технологического кислорода, который выводится на мнемосхему плавильного участка, сильно занижен из-за того, что такие коэффициенты как (PRAS - избыточное давление, заложенное в расчет диафрагм и TRAS - температура  $^{\circ}\text{C}$ ), заложенная в расчет диафрагм) изменены с необходимых значений (1,5; 20) на 0 (рисунок 20). В случае, если вписать данные коэффициенты, показатель расхода технологического кислорода увеличивается на те самые 3000-4000  $\text{м}^3$ . Необходимо проставить те коэффициенты, которые дают объективные величины измеряемых расходов газовых потоков, не подгоняя их под сиюминутные производственные задачи (или проблемы).

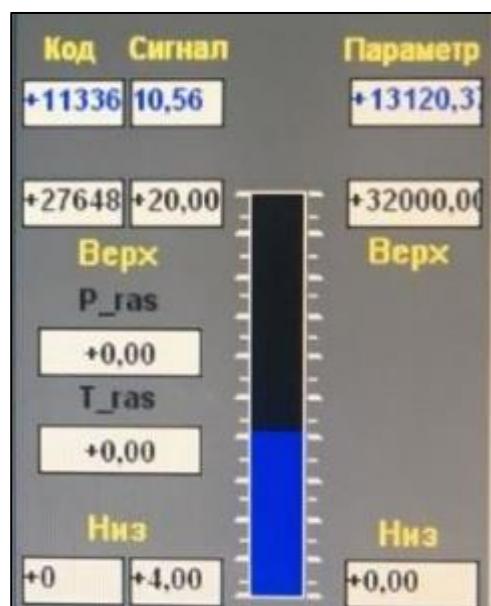


Рисунок 20 – Шкала параметров технологического кислорода

Описанная ситуация совершенно недопустима с точки зрения корректности сбора, представления и хранения важной технологической

информации, необходимой как для управления процессом плавки, так и для анализа ее показателей с целью совершенствования процесса.

Улучшение ситуации с этим вопросом в конце испытаний позволяет надеяться, что проблема решена, но ее необходимо отслеживать и далее, поскольку и в прошлом наблюдались периоды соответствия анализируемых данных, которое затем нарушалось.

## 2.4 Изучение механического разрушения угля

### 2.4.1 Угли первого периода испытаний

Одним из пунктов технического задания было изучение возможного механического измельчения (повышение доли мелких фракций) в процессе транспортировки от склада ПУФ до печи на основе анализа представительных проб, отбираемых в контрольных точках в системе подачи угля и шихты до комплексов ПВ (рис.21).

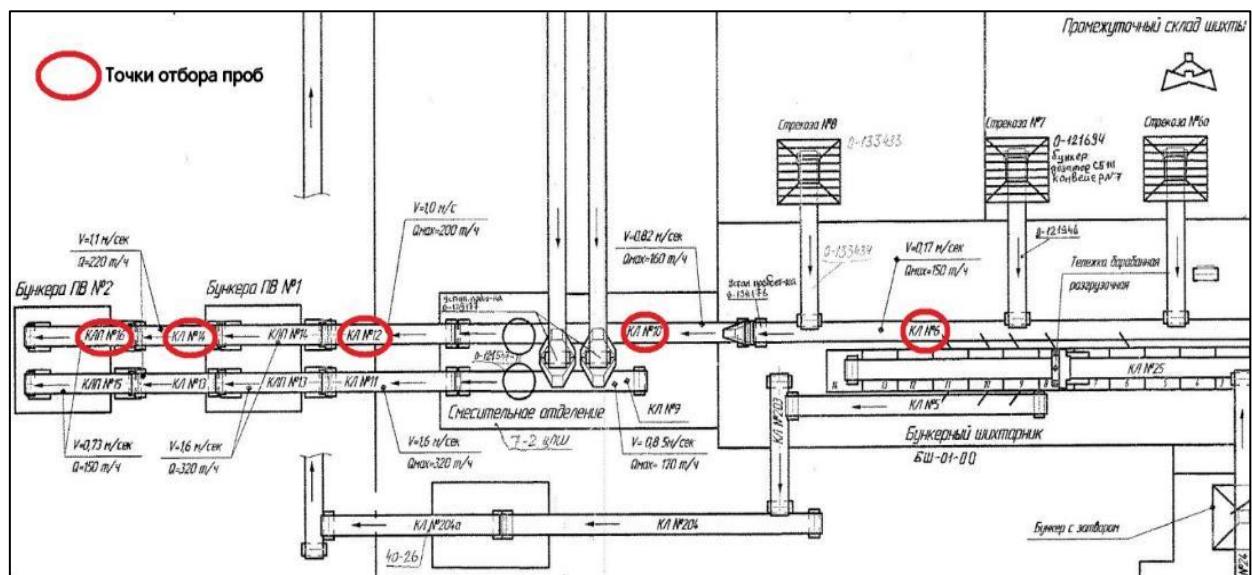


Рисунок 21 – Точки отбора проб для анализов в первый период

Пробы отбирались по ГОСТ 10742-71 на конвейерных лентах транспортёров № 6, 10, 12, 14 и загрузки в ПВ, а также на складе ПУФ. Отбор проб с конвейерной ленты показан на рисунке 22.

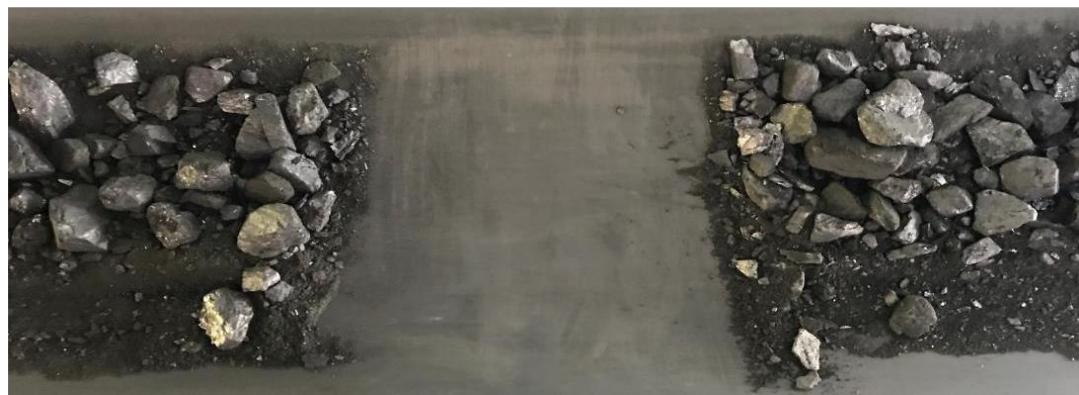


Рисунок 22 – Отбор проб с конвейерной ленты транспортёра

Вид исходных углей «Комир Тау» и антрацит «Южный Кузбасс» перед началом испытаний показаны на рисунке 23.

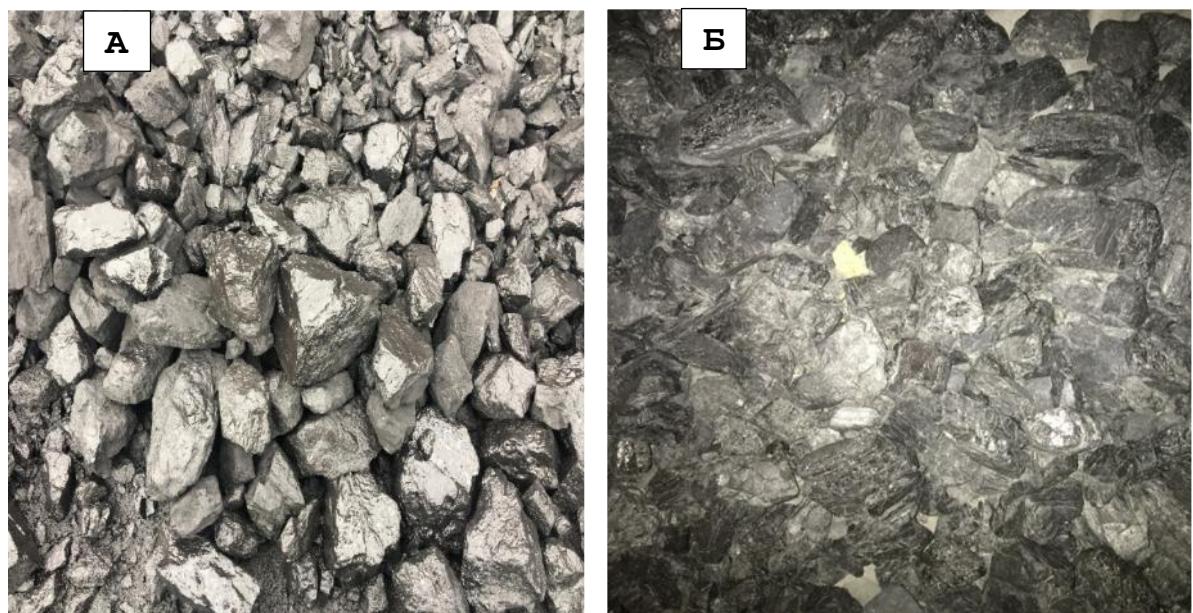


Рисунок 23 – Исходный вид угля «Комир Тау» (А) и «Южный Кузбасс» (Б) складе ПУФ

При изучении возможного механического разрушения каменного угля «Комир Тау» (повышение доли мелких фракций) в процессе его транспортировки от склада ПУФ до комплекса ПВ-2 были отобраны две пробы в начальной и конечной точках: склад ПУФ и конвейер бункера загрузки. Общая масса проб составляла 20 кг. Дополнительно были отобраны пробы с транспортёра № 14 для сопоставления гранулометрических характеристик угля при его транспортировке и пересыпных операциях. График изменения гранулометрической характеристики и медианной крупности каменного угля «Комир Тау» в процессе его транспортировки от склада ПУФ до комплекса ПВ-2 показан на рисунке 24.

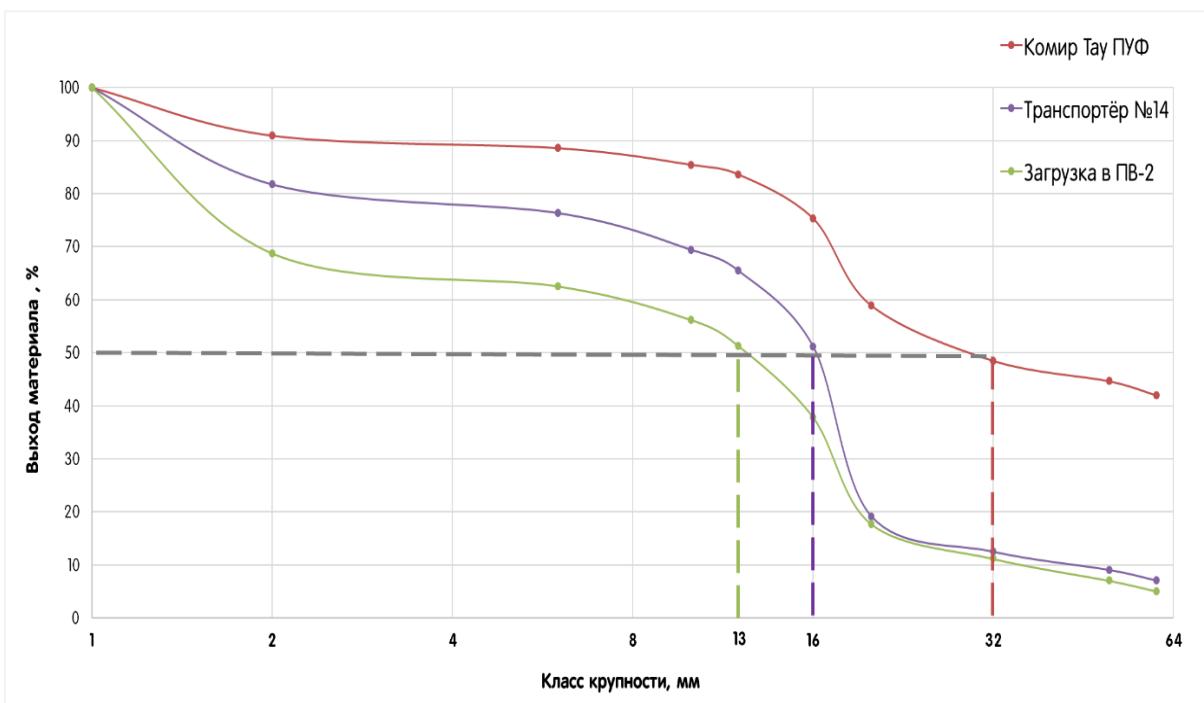


Рисунок 24 – График изменения гранулометрической характеристики и медианной крупности каменного угля «Комир Тау» в процессе его транспортировки

Анализ изменения гранулометрической характеристики каменного угля «Комир Тау» от склада ПУФ до загрузки в ПВ-2 показал, что медианная крупность (средняя) исходного угля, находящегося на складе ПУФ, составила 32 мм, на конвейере № 14 - 16 мм, на загрузке в ПВ-2 - 13 мм. При транспортировке угля по конвейерам, оборудованными узлами пересыпок, до загрузки в ПВ-2 медианная крупность падает в 2,5 раза с 32 мм до 13 мм. Стоит заметить, что выход класса крупности угля + 50 мм снизился с 44,6 до 8,0 процентов и в результате измельчения перешёл в более низшие классы 32, 16 мм и т.д. Скорее всего это вызвано сильным измельчением угля «Комир Тау» во время транспортировки и пересыпки по конвейерам, а также механическими воздействиями при операциях выгрузки, загрузки и транспортировки из ПУФ до промежуточного склада. Разница между начальным и конечным гранулометрическим составом угля «Комир Тау» составляет порядка 59,4 %, в среднем на каждом конвейере медианная крупность каменного угля понижалась на 11,9 %. Общая измельчаемость угля «Комир Тау» составила 32,9 %.

При изучении антрацита «Южный Кузбасс» в процессе его транспортировки от склада ПУФ до комплекса ПВ-2 были отобраны аналогичные пробы в тех же точках, как при каменном угле «Комир Тау». Для более детального анализа изменения гранулометрической характеристики были дополнительно отобраны пробы с транспортёров № 6, 10, 12, 14, 16 и выведена средняя гранулометрия по пробам. График изменения гранулометрической характеристики и медианной крупности угля

антрацит («Южный Кузбасс») в процессе его транспортировки от склада ПУФ до комплекса ПВ-2 показан на рисунке 25.

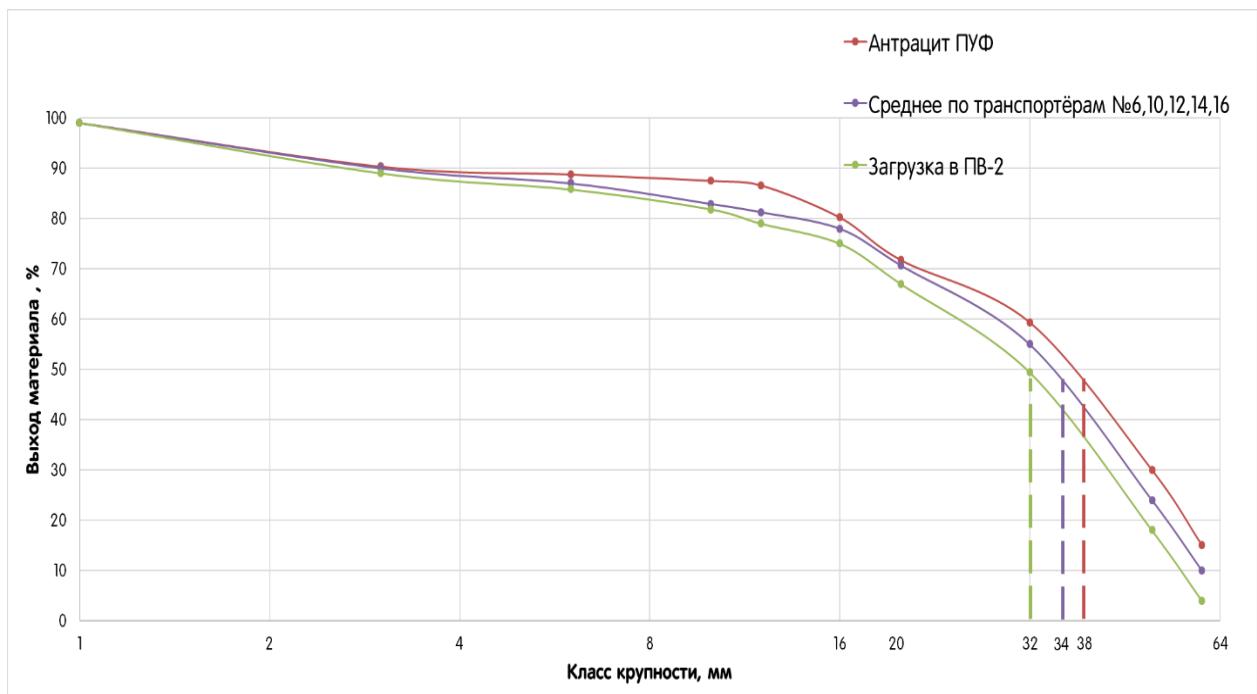


Рисунок 25 – График изменения гранулометрической характеристики и медианной крупности антрацита «Южный Кузбасс» в процессе его транспортировки

Анализ изменения гранулометрической характеристики угля «Антрацит» от склада ПУФ до загрузки в ПВ-2 показал, что медианная крупность исходного угля, находящегося на складе ПУФ, составила 38 мм, в среднем на конвейерах № 6, 10, 12, 14 и 16- 34 мм, на загрузке в ПВ-2 - 32 мм. При транспортировке угля по конвейерам, оборудованными узлами пересыпок, до загрузки в ПВ-2 медианная крупность падает в 1,2 раза с 38 до 32 мм. Выход класса крупности угля +50 мм незначительно изменяется с 30,0 до 18,0 %. Разница между начальным и конечным гранулометрическим составом угля антрацит («Южный Кузбасс») составляет порядка 15,8 %, в среднем на каждом конвейере медианная крупность угля снижалась на 3,1 %. Общая измельчаемость угля «Южный Кузбасс» составила 6,3 %.

## 2.5 Проведение аналитических исследований состава и свойств углей

Помимо определения гранулометрического состава, производился следующий комплекс определений свойств некоторых видов из используемых в испытаниях углей:

- 1 Содержание углерода – ГОСТ 32465-2013;
- 2 Содержание водорода – ГОСТ 32979-2014;

- 3 Содержание азота – ГОСТ 32979-2014;
- 4 Выход летучих веществ – ГОСТ Р 55660-2013;
- 5 Зольность – ГОСТ Р 55661-2013;
- 6 Содержание общей серы – ГОСТ 32979-2014;
- 7 Влажность – ГОСТ 8.649-2015;
- 8 Низшая теплота сгорания – ГОСТ 147-2013.

Результаты исследований свойств антрацита «Южный Кузбасс» представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Результат анализов антрацита "Южный Кузбасс"

Наименование показателя	Результат анализа 1	Сертификат
Содержание углерода, %	95,94	-
Содержание водорода, %	1,98	-
Содержание азота, %	1,38	-
Выход летучих веществ, %	4,23	3,40
Зольность, %	14,01	11,30
Содержание общей серы, %	0,23	0,15
Влажность, %	5,90	7,40
Низшая теплота сгорания, ккал/кг	6848	6559

Результаты проведения анализов угля антрацит «Южный Кузбасс» практически полностью соответствуют полученным сертификационным данным. Результаты анализов каменного угля «Комир Тау» представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Результат анализов каменного угля «Комир Тау»

Наименование показателя	Результат анализа 1	Результат анализа 2	Результат анализа 3	Сертификат
Содержание углерода, %	79,92	79,86	-	-
Содержание водорода, %	5,25	5,31	-	-
Содержание азота, %	0,61	0,54	-	-
Выход летучих веществ, %	33,38	33,83	33,10	24,5
Зольность, %	50,24	50,70	44,60	18,7
Содержание общей серы, %	0,46	0,44	0,55	0,61
Влажность, %	1,90	1,90	2,30	5,4
Низшая теплота сгорания, ккал/кг	3602	3587	3883	5387

Сильное расхождение между сертификационными данными каменного угля «Комир Тау» и значениями, полученными в ходе выполнения анализов, было замечено в зольности и соответственно низшей теплоте сгорания.

## 2.6 Технико-экономические показатели использования угля класса «орешек» и антрацита для компенсации дефицита тепла при плавке медного сульфидного сырья в печи Ванюкова

В данном разделе приведен расчет экономической эффективности использования каменного угля класса «орешек» («Комир Тау») и антрацита «Южный Кузбасс» для компенсации дефицита тепла при плавке медного сульфидного сырья в печи Ванюкова № 2 БМЗ.

Исходные данные:

Производительность печи по шихте – 85 т/ч;

Расход топлива: мазут – 0,8 т/ч; уголь «Комир Тау» – 2,09 т/ч; антрацит – 1,45 т/ч.

Теплотворная способность: мазут – 9500 ккал/кг; уголь – 3880 ккал/кг; антрацит – 6850 ккал/кг.

Принятые цены: мазут – 120 000 тг/т; уголь – 20 000 тг/т; антрацит – 45 000 тг/т.

Расчет затрат:

Затраты на мазут:

$$Z_M = 0,8 \times 120000 = 96000 \text{ тг/ч} \quad (1)$$

Затраты на уголь:

$$Z_{уг} = 2,09 \times 20000 = 41800 \text{ тг/ч} \quad (2)$$

Затраты на антрацит:

$$Z_{\text{ант}} = 1,45 \times 45000 = 65\ 250 \text{ тг/ч.} \quad (3)$$

Экономический эффект:

Экономия при использовании угля:

$$Z_{\text{уг}} = 96\ 000 - 41\ 800 = 54\ 200 \text{ тг/ч.} \quad (4)$$

Экономия при использовании антрацита:

$$Z_{\text{ант}} = 96\ 000 - 65\ 250 = 30\ 750 \text{ тг/ч.} \quad (5)$$

Годовой эффект (330 суток): уголь – 429 млн тг/год; антрацит – 243 млн тг/год.

Таблица 7 – Сравнительная таблица показателей топлива

Показатель	Мазут	Уголь	Антрацит
Расход, т/ч	0,8	2,09	1,45
Затраты, тыс. тг/ч	96	41,8	65,3
Экономия, тыс. тг/ч	-	54,2	30,8
Экономия, млн тг/год	-	429	243

Расчеты показали, что наиболее экономически эффективным является использование угля класса «орешек» «Комир Тау», обеспечивающее экономический эффект порядка 430 млн тг в год на одну печь Ванюкова при отказе от мазута.

### Выводы по разделу 2:

– испытания плавки с использованием угля орешка «Комир – Тау» и антрацита «Южный Кузбасс» показали, что уголь может быть использован для эффективного регулирования теплового баланса плавки без применения дополнительных видов топлива (мазута, природного газа). Даже при использовании угля относительно невысокого качества «Комир Тау» он не менее чем на 90 % (т.е. практически полностью) усваивается ванной расплава, однако отмечено, что при повышенной загрузке 2-3 т/ч угля «Комир Тау» наблюдалось отложение пыли на воротнике котла-utiлизатора, во многом, видимо, благодаря сильному измельчению (30 %) от ПУФ до загрузки ПВ. Проведенный независимый анализ показал аномально высокое значение его зольности (40 %).

– прочный и с малым количеством пыли и летучих антрацит «Южный Кузбасс» практически полностью усваивается ванной расплава. При работе на данном угле можно отметить один из самых высоких показателей по теплосъему кессонами и одновременно с этим низкие температуры на входе в радиационную часть и на выходе из конвективной части котла-utiлизатора. Однако, данный уголь имеет очень высокую стоимость и не может быть рассмотрен в качестве постоянного поставщика.

– можно отметить, что в период испытаний с использованием угля среднее содержание меди в шлаке примерно на 0,1 % ниже, чем в среднем по текущим результатам. Показано (еще раз подтверждено), что увеличение содержания кремнезема в шлаке снижает потери с ним меди. Отладка режимов плавки на шлаки с содержанием около 30 % кремнезема, может снизить потери меди еще примерно на 0,1 %, доведя содержание в отвальных шлаках до ~0,8 %, а возможно и ниже.

– принципиально отлажена методика измерения температуры ванны в печи пиromетром через хвостовую течку. Несмотря на в среднем разумные (адекватные) значения показаний пиromетра, амплитуда колебаний этих значений необъяснимо высока, а конкретные абсолютные показания нередко выходят за корректные значения - как правило, сильно заниженные. Нередко это связано с частичным перекрытием поля зоны видимости пиromетра, например, из-за частичного зарастания течки, в которой пиromетр установлен. Необходима дальнейшая оптимизация условий эксплуатации пиromетра с целью исключения получения некорректных значений.

– в процессе испытаний, на втором и третьем периодах, при замере уровня ванны отмечалось образование газонасыщенного шлака (пористость по высоте шлака и пенный слой на поверхности шлака) как в шлаковом сифоне, так и в печи. Наличие и высота пористого шлака варьировалась в диапазоне (от 400 мм до 1500 мм), размер пены (от 50 мм до 300 мм), при этом образование пены и пористого шлака носит переменный характер. При прочих равных условиях вспениванию шлака будут способствовать: повышенная вязкость шлака (которая зависит от температуры), неравномерность и малая интенсивность перемешивания шлака в барботируемой зоне. Конкретные причины пенообразования в печи и в сифоне ПВ БМЗ необходимо тщательно изучать, для чего, в том числе, были отобраны пробы вспененного шлака для последующего их изучения

– в процессе испытаний, на втором и третьем периоде, выпуск штейна периодически производился через нижний шпур. Помимо этого, для более интенсивного выпуска штейна устанавливалась набойка (~ 300 мм) на переток шлакового сифона для увеличения высоты общей ванны, которая достигала 3000 мм. Подобные действия не способствуют поддержанию стабильных и благоприятных условий перемешивания расплава в печи. На этапе 5 и 6 для оптимизации условий перемешивания надфурменной зоны, общая ванна была снижена до 2500 мм, однако, при замере уровня ванны также отмечалось образование газонасыщенного шлака (см. пункт 9).

– рекомендуется оптимизировать условия перемешивания расплава в печи для более эффективного усвоения угля в расплаве, не допуская его скапливания в зоне под аптеиком и повышая эффективность замешивания в расплав угля, как более крупной, так и мелкой его части. Для этого рекомендуется снизить высоту надфурменной зоны (в расчете на спокойную ванну) до ~0,5-0,6 м и обеспечить равномерное распределение дутья по всей ванне печи, включая зону под аптеиком.

– разница между содержанием мелкой фракции в угле перед загрузкой в печь ее содержанием в исходном угле (ПУФ) для «Комир Тау» составляет порядка 32,9 %, для антрацита «Южный Кузбасс» – 6,3 %.

– одной из основных причин сильного измельчения угля в ходе транспортировки является большое количество пересыпных операций. Помимо пересыпок на конвейерах, сильное измельчение может происходить в ходе загрузки на ПУФ автопогрузчиком материала в автотранспорт, а также зачерпывания угля грейферным краном в промежуточном складе.

Таблица 8 – Данные анализа

<b>Основные параметры</b>	<b>Комир Тау</b>	<b>Южный Кузбасс</b>
Период, дни	31.05 – 05.06	05.06 – 08.06
Кол-во отработанных часов, час	117	80
Расход шихты, т/ч	86	85
Расход угля, т/ч	2	1
Расход флюса, т/ч	3,1	4
Кислород КВС-1, тыс.нм <sup>3</sup>	18830	19450
Воздух КВС-1, тыс.нм <sup>3</sup>	5210	4100
Уд.расход кислорода (эксп.), нм <sup>3</sup> /т	не фикс.	не фикс.
Температура в сифоне, °С	1266	1271
Температура штейна, °С	1154	1166
Температура в печи, °С	1200	1271
Теплосъем кессонами, тыс.ккал/ч	5520	5920
Паросъем КУ, т/ч	24	23
Температура газа на воротнике КУ, °С	1033	1040
Макс. Темп. газа на воротнике КУ / кол-во часов при температуре более 1100°C	-	-
Мин. Темп. Газа на воротнике КУ / кол-во часов при температуре менее 1050°C	961 / 43	990 / 52
Температура газа на выходе из КУ, °С	540	510
Макс. Темп газа на выходе из КУ / кол-во часов при температуре более 580°C	606 / 11	-
Мин. Темп газа на выходе из КУ / кол-во часов при температуре менее 500°C	446 / 9	455 / 32
Макс. Темп газа перед дымососами / кол-во часов при температуре более 450°C	443/0	452/1
Мин. Темп газа перед дымососами / кол-во часов при температуре менее 430°C	309/0	344/86

*Продолжение Таблицы 8 – Данные анализа*

Количество ГИО за смену	2	2		
Общая высота ванны, мм	2700	2690		
Высота пены, мм	не фикс.	не фикс.		
Содержание Си в штейне, %	54,4	51		
Содержание Си в шлаке, %	0,86	0,87		
Содержание SiO <sub>2</sub> в шлаке, %	26,5	27		
Содержание компонентов в шихте, %	закладка	PCA	закладка	PCA
Cu	18,8	19,2	18,9	19,3
S	29,2	30	29,1	31
SiO <sub>2</sub>	10,8	10,7	11,0	10,2
Fe	25,5	26,3	25,7	27
CaO	1,8	1	1,5	0,9
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0,1	0,1	0,2	0,1
Кол-во отработанных штабелей всего / без пирита	1 / 0		1 / 0	
Измельчаемость угля от ПУФ до загрузки, %	32,9		6,3	
*Выход летучих, %	33		4	
*Зольность, %	44		14	
*Низшая теплота сгорания, ккал/кг	3883		6848	
Склонность к настылеобразованию на воротнике КУ	высокая		не фикс.	

### 3 Автоматизации и управления технологическими процессами

#### 3.1 Система автоматизации и управления технологическими процессами печей Ванюкова на БМЗ

Архитектура существующих АСУТП ПВ1 и ПВ2 представляют собой децентрализованные системы контроля и управления с распределенной системой станций ввода-вывода сигналов с объекта, включающая в себя три уровня иерархии, указанные на рисунке 26



Рисунок 26 – Схема иерархии архитектуры АСУТП ПВ БМЗ

На верхнем уровне реализован «децентрализованный» вариант технической структуры на базе рабочих станций с унифицированным набором прикладной функциональности в виде АРМов. Каждый отдельный АРМ реализует индивидуальный SCADA-проект на основе пакета WinCC со своими мнемосхемами, тегами, сценариями и базой данных. Отдельного, специализированного, выделенного сервера для хранения данных не предусмотрено. Данные о технологическом процессе формируются и хранятся на каждой рабочей станции АРМа специалиста независимо и в принципе, не имеют единой временной синхронизации между собой. При возникновении внештатных ситуаций: сбое в работе, выключении рабочей станции, обрыве сетевых коммуникаций, обеспечивающих межуровневый обмен информацией, неизбежна потеря архивных данных технологического процесса на период внештатной ситуации, и как следствие, нарушение целостности архивных данных и невозможность проанализировать ситуацию, произошедшую на объекте. В АСУТП ПВ1 и ПВ2 предусмотрено 5 рабочих станций: Плавильщика, Котельщика, Газовщика, операторов ТК и МНУ, инсталлированы эксклюзивные проекты.

Архитектура среднего (технологического) уровня соответствует централизованной концепции построения системы автоматизации. В качестве единого интеллектуального ядра для всех технологических переделов, кроме МНУ, как в АСУТП ПВ1, так и в АСУТП ПВ2 используются резервированный вариант программируемых логических контроллеров.

В основе аппаратной платформы контроллерных станций каждой АСУТП ПВ используется программируемые логические контроллеры с резервированием Simatic S7 414-4H фирмы Siemens, в комплекте со станциями распределенного ввода и вывода ET200M с активной шиной и сигнальными модулями для обработки входных, выходных сигналов аналогового и дискретного типа. Центральный контроллер АСУТП ПВ соединен с распределенными станциями ввода вывода ET200M, по средствам открытой промышленной сети ProfiBus, с дублированием линий связи. Линии связи смонтированы в разных кабельных трассах, для достижения большей надежности и отказоустойчивости.

Мониторинг за технологическими параметрами и управление мазутно-насосными установками (далее МНУ) в АСУТП ПВ1 и ПВ 2 реализован на отдельных программируемых логических контроллерах. Для МНУ ПВ1 используется контроллер Simatic S7 315-2 PN/DP, с двумя станциями распределенного ввода-вывода IM 153-1 и IM 153-2. Соединение между контроллером и станциями ввода вывода реализовано по сети ProfiBus, без резервирования канала связи. Для МНУ ПВ2 используются контроллеры Simatic S7 315-2 PN/DP, и два удаленных контроллера Simatic S7 313C-2DP с сигнальными модулями на встроеннойшине, соединенные между собой сетью ProfiBus.

В качестве аппаратной платформы верхнего уровня, используются промышленные ПК SIMATIC RACK PC IL 43, с установленным программным обеспечением Simatic WinCC. Рабочие станции операторов АСУТП объединены с соответствующими контроллерными станциями по сети Ethernet, через коммутаторы согласно приведенной структурной схеме КТС на рисунке 2.

Коммуникации АСУТП ПВ1, ПВ2 обеспечиваются средствами сетевых технологий ProfiBus, Industrial Ethernet и PROFINET.

Коммуникации АСУТП ПВ1, ПВ2 со смежными системами АСУОТ и PI System осуществляются с использованием шлюзовых ПК, на которых инсталлировано ПО полностью дублирующее функциональность рабочих станций АСУТП. То есть все сигналы и параметры, которые отображаются на АРМ операторов-технологов, передаются на уровень «MES» в PI System при помощи протокола OPC-DA. Другими словами, шлюзовые ПК используются как OPC-сервер, который входит в состав программного обеспечения Simatic NET PC Software. Для обеспечения коммуникаций на каждом шлюзовом ПК инсталлировано программное обеспечение WinCC с расширенным проектом прикладного ПО АРМа «Плавильщика».

Расширение касается добавления в проект тегов системы теплоконтроля кессонов. Шлюзовые ПК подключены к контроллерам АСУТП ПВ1, ПВ2 через Ethernet-коммуникаторы и SHDSL модемы, соединенные между собой двух проводной линией связи.

Коммуникация удаленных станций ввода вывода IM 153-2 с центральным контроллером CPU 414-4H осуществляется по промышленной сети ProfiBus, используя протокол передачи данных Profibus DP. Для обмена информацией между технологическим и диспетчерским уровнями используется коммуникационный процессор CR 443-1. Он оснащен встроенным микропроцессором и выполняет автономное управление сетевым обменом данными, разгружая от этих задач центральный процессор контроллера.

Контроллерные станции МНУ АСУТП ПВ1,2 подключаются к сети Industrial Ethernet при помощи встроенного интерфейса PROFINET центрального процессорного устройства CPU 315-2 PN/PD. ПО PROFINET базируется на функциональных возможностях Ethernet TCP/IP.

Для целей сетевого обмена между рабочими станциями операторов-технологов используются сетевые концентраторы не промышленного исполнения и один промышленного исполнения со степенью защиты IP30.

Для визуализации диагностики каналов связи и контроллеров в АСУТП ПВ1 и ПВ2 реализована специальная мнемосхема с функцией мониторинга и диагностики линий передачи данных, используемых в проекте.

Информационное взаимодействие АСУТП ПВ с АСУОТ осуществляется на основе технологии OPC, а именно по протоколу обмена OPC-DA.

Для обмена информацией с MES-системой PI System в структуре КТС предусмотрены два шлюзовых персональных компьютера, которые выполняют функции серверов данных для PI-System. Инсталлированное на них ПО полностью дублирует прикладное ПО рабочей станции плавильщика. Это обеспечивает доступ MES – системы ко всему спектру параметров баз данных технологического уровня АСУТП при помощи упомянутого выше протокольного механизма OPC-DA. В качестве драйверов обмена используются OPC-сервера инсталлированные на шлюзовых ПК в составе программного обеспечения SIMATIC NET PC Software.

Структурная схема КТС комплексов АСУТП ПВ1 и ПВ2 приведена на рисунке 27. Она иллюстрирует состав основных аппаратных компонентов, внутренние сетевые коммуникации, а также взаимодействие с внешними информационными системами «АСУОТ» (MES) и «PI System».

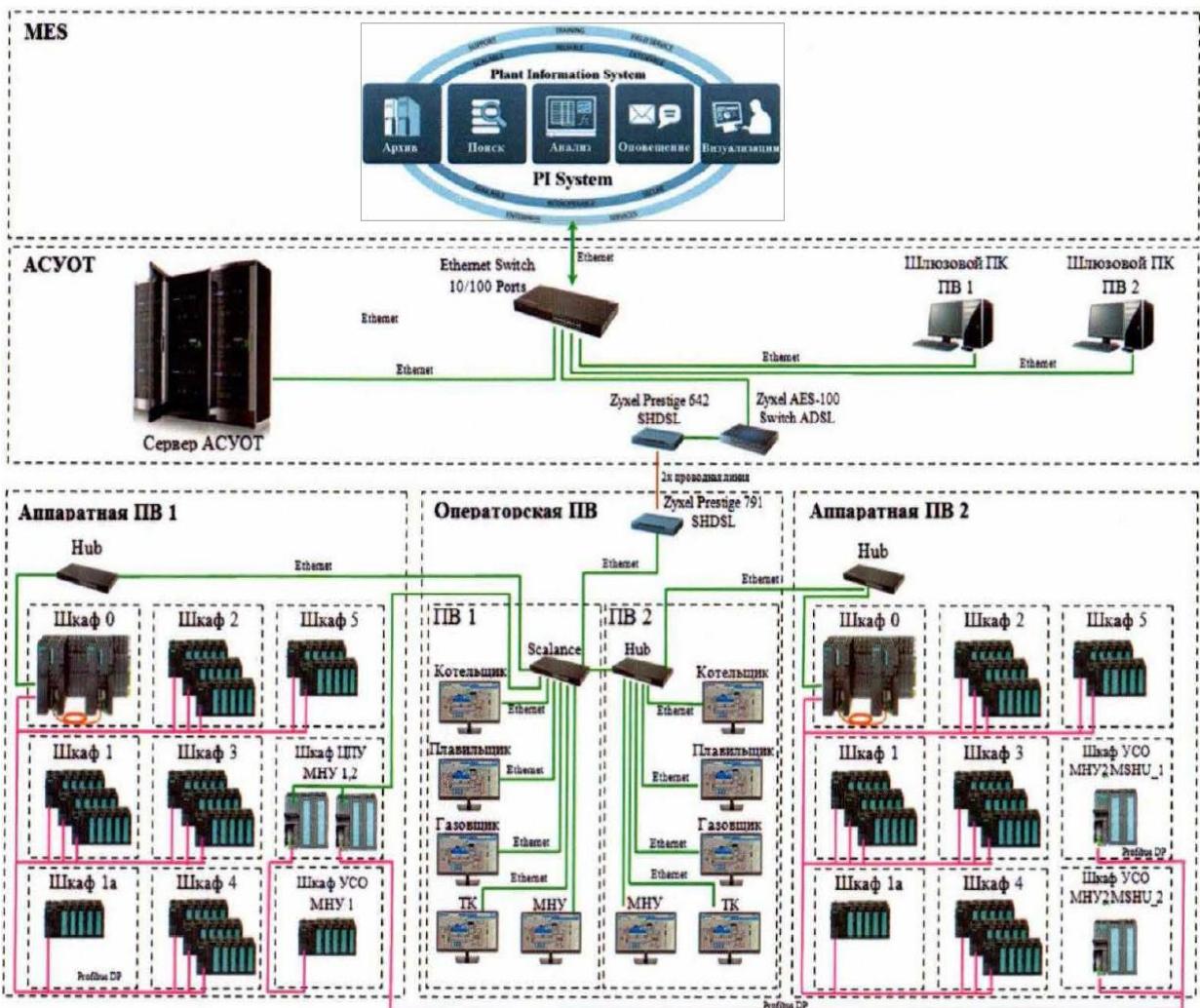


Рисунок 27 – Структурная схема КТС

Система автоматизации и управления технологическими процессами печей Ванюкова (АСУТП ПВ1 и ПВ2) Балхашского медеплавильного завода построена по децентрализованной иерархической архитектуре с распределённой системой ввода-вывода и резервированием ключевых элементов управления. Архитектура системы соответствует классической трёхуровневой модели АСУТП и ориентирована на обеспечение высокой надёжности, отказоустойчивости и непрерывности технологического процесса.

АСУТП ПВ1 и ПВ2 включает следующие уровни:

1 нижний (полевой) уровень — датчики, исполнительные механизмы, распределённые станции ввода-вывода;

2 средний (технологический) уровень — программируемые логические контроллеры (ПЛК);

3 верхний (диспетчерский) уровень — автоматизированные рабочие места (АРМ) операторов и шлюзовые ПК для обмена с MES и PI System.

### 3.1.1 Верхний уровень АСУТП (диспетчерский уровень)

Верхний уровень АСУТП реализован в виде децентрализованной SCADA-архитектуры, основанной на отдельных автоматизированных рабочих местах операторов (АРМ), функционирующих под управлением программного обеспечения SIMATIC WinCC.

В составе АСУТП ПВ1 и ПВ2 предусмотрено пять АРМ:

- 1 АРМ плавильщика;
- 2 АРМ котельщика;
- 3 АРМ газовщика;
- 4 АРМ оператора ТК;
- 5 АРМ оператора МНУ.

Каждый АРМ реализует индивидуальный SCADA-проект, включающий:

- 1 собственные мнемосхемы;
- 2 локальные архивы параметров;
- 3 индивидуальные сценарии и скрипты;
- 4 локальную базу данных.

Отсутствие выделенного серверного узла хранения данных и временной синхронизации между АРМ приводит к следующим системным ограничениям:

- 1 невозможность формирования единого технологического архива;
- 2 потеря данных при отказе или выключении отдельного АРМ;
- 3 отсутствие глобальной временной метки (time stamp);
- 4 невозможность корректного постфактум-анализа аварийных ситуаций;
- 5 снижение качества аналитики и оптимизации режимов.

Таким образом, существующая архитектура верхнего уровня соответствует локально-ориентированной SCADA-модели, характерной для АСУТП предыдущего поколения.

### 3.1.2 Средний уровень АСУТП (технологический уровень)

Средний уровень АСУТП ПВ1 и ПВ2 реализован по централизованной концепции с использованием резервированных программируемых логических контроллеров.

Контроллеры основного технологического процесса. В качестве центрального ядра АСУТП используются резервированные ПЛК SIMATIC S7-414-4H фирмы Siemens, обеспечивающие:

- 1 горячее резервирование CPU;
- 2 резервирование линий связи;
- 3 автоматическое переключение при отказах;
- 4 непрерывность управления технологическим процессом.

Контроллеры связаны с распределёнными станциями ввода-вывода ET200M по промышленной сети PROFIBUS DP с двойным резервированием линий, проложенных по разным кабельным трассам. Расчёт надёжности канала связи PROFIBUS DP

Вероятность отказа одной линии связи:

$$P_1 = 1 - R \quad (6)$$

При резервировании двух независимых линий:

$$P_{\text{общ}} = P_1^2 \quad (7)$$

Таким образом, при типовой надёжности одной линии 0,98:

$$P_{\text{общ}} = (1 - 0,98)^2 = 0,0004 \quad (8)$$

Это обеспечивает повышение надёжности в 50 раз, что критически важно для печей Ванюкова как непрерывных агрегатов.

### 3.1.3 Управление мазутно-нагревательными установками (МНУ)

Системы МНУ ПВ1 и ПВ2 выделены в отдельные контроллерные подсистемы, что снижает нагрузку на центральный ПЛК и повышает отказоустойчивость.

МНУ ПВ1

- 1 ПЛК SIMATIC S7-315-2 PN/DP;
- 2 две станции IM153-1 и IM153-2;
- 3 связь по PROFIBUS DP без резервирования.

МНУ ПВ2;

- 1 центральный ПЛК S7-315-2 PN/DP;
- 2 два удалённых ПЛК S7-313C-2DP;
- 3 PROFIBUS DP между контроллерами.

Отсутствие резервирования связи PROFIBUS в подсистемах МНУ является потенциальным уязвимым местом, однако оправдано меньшей критичностью МНУ по сравнению с основным процессом плавки.

### 3.1.4 Полевой уровень и распределённый ввод-вывод

Полевой уровень включает:

- 1 аналоговые и дискретные датчики температуры, давления, расхода;
- 2 исполнительные механизмы (клапаны, задвижки, приводы);

3 распределённые станции ET200M и IM153.

Использование распределённого ввода-вывода позволяет:

- минимизировать длину сигнальных кабелей;
- повысить помехоустойчивость;
- упростить масштабирование системы.

### 3.1.5 Коммуникационная инфраструктура АСУТП

В АСУТП ПВ1 и ПВ2 применяются следующие сетевые технологии, указанные в таблице 9

Таблица 9 – Сетевые технологии АСУТП ПВ–1 и ПВ–2

Уровень	Сеть	Назначение
Полевой	PROFIBUS DP	Ввод-вывод сигналов
Технологический	Industrial Ethernet	Связь ПЛК–АРМ
Технологический	PROFINET	Связь МНУ
Информационный	Ethernet	SCADA и шлюзы
Межсистемный	OPC DA	Обмен с MES и PI System

Для разгрузки центральных процессоров применяются коммуникационные процессоры СР 443-1, обеспечивающие автономный сетевой обмен.

### 3.1.6 Информационное взаимодействие с MES и PI System

Обмен данными с MES (PI System) и АСУТП осуществляется через шлюзовые ПК, выполняющие функции OPC-серверов.

Особенности решения:

- 1 использование OPC DA;
- 2 дублирование функциональности АРМа плавильщика;
- 3 передача всех технологических параметров в PI System;
- 4 связь по Ethernet и SHDSL-модемам.

#### Расчёт трафика обмена OPC

При числе тегов ~3000 и периоде опроса 1 с:

$$V \approx 3000 \times 16 \text{ байт} = 48 \text{ кБ/с} \quad (9)$$

Даже с учётом дублирования каналов — это значение не превышает 5 % пропускной способности Ethernet, что подтверждает корректность выбранного решения.

### **3.1.7 Общая оценка уровня автоматизации**

Существующая АСУТП ПВ1 и ПВ2 характеризуется:

Преимущества:

- 1 резервированные ПЛК и каналы PROFIBUS;
- 2 распределённый ввод-вывод;
- 3 развитая диагностика;
- 4 интеграция с PI System.

Ограничения:

- 1 отсутствие централизованного архива;
- 2 децентрализованное хранение данных;
- 3 устаревшая модель OPC DA;
- 4 использование непроизводственных сетевых концентраторов.

В целом, проведенные расчеты и анализ показывает, что АСУТП ПВ1 и ПВ2 соответствует уровню зрелости 2–3 по ISA-95, с высокой надёжностью управления, но ограниченными аналитическими и интеграционными возможностями.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведены опытно – промышленные испытания замещения мазута углём в печи Ванюкова ПВ – 2 БМЗ в период 31.05 – 08.06.2025.

Испытания выполнены в 2 этапа:

Этап 1: уголь класса «орешек» «Комир Тау».

Этап 2: антрацит «Южный Кузбасс».

Выполнен сбор и анализ данных по: производительности, расходам топлива, температурным режимам, теплопотерям и теплосъёму, показателям котла-утилизатора (температуры газа, паросъёма), составам продуктов плавки (штейн/шлаки), корректности данных PI System и журналов, гранулометрии угля на трассе подачи, показателям качества углей (зольность, летучие, Qnr).

Испытания выполнены при сопоставимых, относительно стабильных условиях по составу шихты; основной фактор воздействия – вид и расход топлива.

Подтверждена возможность ведения режима без мазута, регулируя тепловой баланс расходом твёрдого топлива.

Режим в среднем удерживался в рабочем диапазоне  $\sim 1230\text{--}1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , но колебания значительны; выявлены причины искажения показаний пирометра и требования к доработке узла измерения.

При угле «Комир Тау» отмечена склонность к отложениям/настылеобразованию на воротнике КУ. При антраците – не фиксировалось (по представленным данным).

При работе на угле с высокой долей мелочи повышается риск отложений в КУ; антрацит технологически более “чистый”, но экономически проблемный.

Установлено, что расчётные и фактические расходы топлива согласуются:

антрацит: расчёт 1,55 т/ч, факт 1,45 т/ч

уголь: расчёт  $\sim 1,9$  т/ч (при пылевыносе 1,5 %), факт 2,09 т/ч

при повышенном пылевыносе для «Комир Тау» расчёт  $\sim 2,12$  т/ч, что близко к факту 2,09 т/ч. Сделан вывод: степень усвоения угля ванной не ниже 90 %.

Выполнена оценка теплового эффекта догоорания пыли (при 10 % выноса): дополнительное тепло  $\sim 1$  Гкал; возможный рост температуры газов  $\sim + 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; ожидаемый прирост паросъёма  $\sim 1$  т/ч; что согласуется с наблюдаемой разницей паропроизводительности (порядка 1,4 т/ч между вариантами топлива).

Установлено, что уголь «Комир Тау» в целом эффективно сгорает, но мелкая фракция может частично догоорать в газоходе/КУ, влияя на отложения и режим теплообмена.

Установлено, что гранулометрия и разрушение топлива при транспортировке «Комир Тау»: медианная крупность: 32 мм (ПУФ)  $\rightarrow$  13 мм

(перед печью), снижение в 2,5 раза; класс +50 мм: 44,6 % → 8,0 %; общая измельчаемость: 32,9 %. Антрацит: медианная крупность: 38 мм → 32 мм, снижение в 1,2 раза; общая измельчаемость: 6,3 %

Установлено, что ключевая причина пыли/отложений при «Комир Тау» – механическое измельчение на трассе (пересыпки, погрузка/разгрузка, грейфер).

Установлено, что уголь «Комир Тау» имеет нестабильное/низкое качество (высокая зольность, низкая теплота сгорания), что влияет на расход топлива и образование пыли; антрацит технологически лучше, но дорогой.

Относительно качества продуктов плавки (технологические эффекты) установлены средневзвешенные показатели:

Си в штейне:

54,20 % (этап1) → 51,20 % (этап2)

Си в отвальном шлаке:

0,85 % (этап1) → 0,87 % (этап2) (различия малы)

SiO<sub>2</sub> в отвальном шлаке:

26,6 % → 27,3 %

Магнетит в шлаке с перетока:

9,96 % → 9,89 %

Также установлено:

1 при угле среднее содержание Си в шлаке было примерно на 0,1 % ниже, чем в текущих режимах (по тексту),

2 увеличение SiO<sub>2</sub> в шлаке снижает потери Си; доведение SiO<sub>2</sub> до ~ 30 % может дополнительно снизить Си в шлаке на ~ 0,1 % (оценочно, по выводам авторов наблюдений).

Установлено, что качество продуктов не ухудшилось; есть потенциал снижения потерь меди при оптимизации SiO<sub>2</sub> и режима.

Впервые выполнен анализ корректности данных и выявленные проблемы АСУТП/PI System. Выявленные критические проблемы:

1 Невязка расходов дутья КВС-1: различия до 7–8 тыс. м<sup>3</sup>/ч между “общим дутьём” и суммой воздух+ТК.

2 Данные МНУ (мазут/кислород на горение) не интегрированы в PI System (только скриншоты).

3 Искажение расхода технологического кислорода из-за некорректных коэффициентов PRAS/TRAS, установленных в “0”, что занижает расход на ~3000–4000 м<sup>3</sup>.

Установлено, что качество измерений и хранения данных признано недостаточным для точного управления и анализа; требуется нормализация вычислений расходов, синхронизация источников и исключение “ручных подгонок”.

Таким образом, подтверждена возможность работы печи Ванюкова без мазута, регулируя тепловой баланс углём: 2,09 т/ч (Комир-Тау) и 1,45 т/ч (антрацит) при производительности ~ 85 т/ч.

Установлено, что степень усвоения угля ванной расплава составляет не менее 90 %; для «Комир Тау» вероятен повышенный пылевынос (до ~ 10 % в оценке), что связано с сильным измельчением (32,9 %) по трассе подачи.

Для повышения эффективности и снижения рисков настылеобразования необходимо:

стабилизировать тепловой режим (снизить колебания теплосъёма 20–30 %/1–2 смены),

улучшить перемешивание и условия сгорания угля (надфурменная зона 0,5–0,6 м, равномерное дутьё по длине печи, включая зону под аптеиком),

доработать пиromетрический контроль (исключить зарастание течки и локальные перегревы зоны измерения).

Установлено, что существующая система данных (PI/АСУТП) имеет существенные дефекты в корректности измерений (невязки по дутью и ТК до 7–8 тыс. м<sup>3</sup>/ч, ошибки коэффициентов PRAS/TRAS 3000–4000 м<sup>3</sup>), что требует технической нормализации и повышения качества цифрового контроля.

Установлено, что наиболее экономически эффективным является использование угля класса «орешек» “Комир Тау”, обеспечивающее экономический эффект порядка 430 млн тг в год на одну печь Ванюкова при отказе от мазута.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Досмухамедов С.А., Есимов Т., Дюсебекова М.А. Practical application of CFD models for autogenous smelting at Balkhash // Российская металлургия. – 2018. – №7. – С. 56–72.
- 2 Кенжалинов Б.С., Досмухамедов С.А., Есимов Т. Управление процессом и оптимизация теплового режима в печах автогенной плавки // Металлургические транзакции В. – 2019. – Vol.50. – Р. 401–417.
- 3 Квятковский С.А., Досмухамедов С.А. Тепловой анализ и оптимизация промышленной автогенной плавки // Цветная металлургия. – 2016. – №5. – С. 30–46.
- 4 Бацедони М., Росси Ф. Термодинамическое моделирование теплового баланса в автогенных печах // Металлургия. – 2020. – №5. – С. 45–58.
- 5 Dosmukhamedov S., Akhmetov R., Dyussebekova, M.A. Material and thermal flow analysis in autogenous smelting furnaces // Metallurgical Research & Technology. – 2021. – Vol.118, №6. – P.345–362.
- 6 Zhang Q., Argyn B., Yessimov T. Thermal balance optimization in industrial autogenous furnaces // Metallurgical Transactions B. – 2012. – Vol.43. – P.234–248.
- 7 Chen Y., Zhao Y., Brown P. Temperature stabilization techniques in flash smelting // Minerals Engineering. – 2022. – Vol.177. – P.105–119.
- 8 Johnson K., Patel S., Maghsoudizadeh F. Environmental impact assessment of autogenous smelting processes // Journal of Cleaner Production. – 2019. – Vol.233. – P.1352–1365.
- 9 Mukhamedzhanov K., Serikbayev R., Dyussebekova, M.A. Analysis of multi-phase flow and temperature distribution in autogenous furnaces // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2021. – Vol.60. – P.477–492.
- 10 Dosmukhamedov S., Kenzhalinov B., Dyussebekova, M.A. Energy efficiency and emissions control in autogenous smelting at Balkhash plant // Environmental Engineering and Management Journal. – 2021. – Vol.20, №11. – P.2003–2016.
- 11 Аргын Б., Есимов Т., Чжан Ц. Энергетический анализ процессов автогенной плавки меди // Вестник металлургии. – 2008. – №3. – С. 12–24.
- 12 Квятковский С.А., Дюсебекова М.А. Оптимизация теплового режима автогенной плавки // Известия вузов. Горный журнал. – 2012. – №6. – С. 34–47.
- 13 Кенжалинов Б.С. Управление подачей концентрата и дутья в медеплавильных печах // Металлургический журнал Казахстана. – 2010. – №2. – С. 15–29.
- 14 Досмухамедов С.А., Дюсебекова М.А. Применение термодинамических моделей для оптимизации печей автогенной плавки // Технологии цветной металлургии. – 2015. – №4. – С. 21–38.

- 15 Фёдоров В.И., Сулимов Р.А. Автоматизация с нечёткими регуляторами при автогенной плавке // Журнал автоматизации металлургических процессов. – 2019. – Т.33, №4. – С. 45–59.
- 16 Квятковский С.А., Дюсебекова М.А. Тепловой поток и оптимизация теплового режима в печах автогенной плавки // Цветная металлургия. – 2014. – №3. – С. 22–37.
- 17 Кенжалинов Б.С., Досмухамедов С.А., Есимов Т. Управление процессом и оптимизация теплового режима в печах автогенной плавки // Металлургические транзакции В. – 2019. – Vol.50. – Р. 401–417.
- 18 Фёдоров В.И., Сулимов Р.А., Кенжалинов Б.С. Интеллектуальные системы управления для оптимизации автогенной плавки // Журнал автоматизации металлургических процессов. – 2020. – Т.34, №2. – С. 78–92.
- 19 Досмухамедов С.А., Акметов Р., Есимов Т. Анализ распределения температуры в автогенных плавильных печах // Российский журнал цветных металлов. – 2017. – Vol.58, №4. – С. 45–61.
- 20 Дюсебекова М.А., Мусабеков А., Бектурганов Т. Энергоэффективность промышленных автогенных печей // Минеральная инженерия. – 2019. – Vol.135. – С. 87–101.
- 21 Досмухамедов С.А., Акметов Р., Квятковский С.А. Промышленное применение CFD и контроль температуры // Российский журнал цветных металлов. – 2018. – Vol.59, №6. – С. 22–40.
- 22 Квятковский С.А., Дюсебекова М.А. Тепловой поток и оптимизация теплового режима в печах автогенной плавки // Цветная металлургия. – 2014. – №3. – С. 22–37.
- 23 Квятковский С.А., Досмухамедов С.А. Тепловой анализ и оптимизация промышленной автогенной плавки // Цветная металлургия. – 2016. – №5. – С. 30–46.
- 24 Фёдоров В.И., Сулимов Р.А. Интеллектуальные системы управления для оптимизации автогенной плавки // Журнал автоматизации металлургических процессов. – 2020. – Т.34, №2. – С. 78–92.
- 25 Досмухамедов С.А., Акметов Р., Есимов Т. Temperature distribution analysis in autogenous smelting furnaces // Russian Journal of Nonferrous Metals. – 2017. – Vol.58, №4. – Р. 45–61.
- 26 Дюсебекова М.А., Мусабеков А., Бектурганов Т. Энергоэффективность в промышленных автогенных печах // Минеральная инженерия. – 2019. – Vol.135. – С. 87–101.
- 27 Musabekov A., Bekturanov T. Fuzzy and PID control of temperature in autogenous flash smelting furnaces // Journal of Mining and Metallurgy. – 2025. – Vol.61, №2. – Р.112–127.
- 28 Patel S., Maghsoudizadeh F., Johnson K. 4E analysis (Energy, Exergy, Environment, Economy) of autogenous smelting with integrated CFD and intelligent controllers // Minerals Engineering. – 2025. – Vol.185. – Р.107–121.

29 Taskinen J., Jokilaakso A. CFD modeling of multiphase flow in autogenous smelting furnaces // Chemical Engineering Research and Design. – 2021. – Vol.167. – P.320–336.

30 Zhang L., Ismailov T., Mukhanov A. Integration of sensor data for process control in flash smelting // Journal of Process Control. – 2015. – Vol.25. – P.83–97.

31 Garcia M., Lopez R., Fernandez J. Simulation of heat transfer in flash smelting furnaces // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2018. – Vol.123. – P.112–127.

32 Musabekov A., Bekturganov T., Dosmukhamedov S., Dyussebekova, M.A., Yessimov T. Integration of intelligent control with industrial data for autogenous smelting // Minerals Engineering. – 2025. – Vol.187. – P.145–160.

33 Johnson K., Maghsoudizadeh F., Brown P. Energy and emission efficiency in autogenous smelting // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol.260. – P.121–138.

34 Chen Y., Lopez R., Fernandez J. Heat transfer and multi-phase modeling in flash smelting // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2019. – Vol.139. – P.671–686.

35 Patel S., Musabekov A., Bekturganov T. Adaptive control and optimization in industrial autogenous smelting // Minerals Engineering. – 2021. – Vol.164. – P.34–49.

36 Taskinen J., Zhang L., Mukhanov A. CFD simulations of slag-metal interactions in autogenous furnaces // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2018. – Vol.49. – P.1023–1039.

37 Zhang L., Ismailov T., Johnson K. Integration of CFD and process data for flash smelting // Journal of Process Control. – 2017. – Vol.55. – P.12–28.

38 Chen Y., Brown P., Lopez R. Temperature control and heat distribution in autogenous furnaces // Minerals Engineering. – 2021. – Vol.164. – P.67–83.

39 Dosmukhamedov S., Dyussebekova, M.A., Yessimov T. Optimization of concentrate feeding in industrial autogenous smelting // Russian Metallurgy. – 2020. – №9. – P.41–59.

40 Musabekov A., Dyussebekova, M.A., Bekturganov T., Yessimov T. Integrated approach to process optimization in autogenous smelting // Minerals Engineering. – 2023. – Vol.198. – P.101–119.

## Приложение А

### Оттиск научной статьи по теме исследований

SATBAYEV  
UNIVERSITY



Ө.А.Байқоңыров атындағы Тау-кен metallurgия институты  
Горно-металлургический институт им. О. А. Байконурова

### ЕҢБЕКТЕР ЖИНАҒЫ

Халықаралық ғылыми-тәжірибелік конференциясының  
«ТАУ-КЕН МЕТАЛЛУРГИЯ САЛАСЫНДАҒЫ ТУРАҚТЫ ДАМУ  
ЖӘНЕ ЗАМАНАУИ КЕШЕНДІ, РЕСУРСТАРДЫ ҮНӘМДЕЙТІН  
ЖӘНЕ ЭНЕРГИЯ СЫЙЫМДЫЛЫҚТЫ ТЕХНОЛОГИЯЛАР»

22 қараша 2024 жылғы, Алматы

### СБОРНИК ТРУДОВ

Международной научно-практической конференции  
«УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ И СОВРЕМЕННЫЕ КОМПЛЕКСНЫЕ,  
РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ И ЭНЕРГОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ  
В ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ»

22 ноября 2024 года, Алматы

### PROCEEDINGS

International Scientific and Practical Conference  
« SUSTAINABLE DEVELOPMENT AND MODERN INTEGRATED,  
RESOURCE-SAVING AND ENERGY-INTENSIVE TECHNOLOGIES  
IN THE MINING AND METALLURGICAL INDUSTRY »

November 22, 2024, Almaty

Алматы 2024

## Продолжение А

### РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ ПЕЧИ ВАНЮКОВА НА БАЛХАШСКОМ МЕДЕПЛАВИЛЬНОМ ЗАВОДЕ

Касымбеков Б.Ж., Чепуштанова Т.А., Булгучева Д.М.  
Satbayev University, г. Алматы, Казахстан

*Современное состояние научно-технической проблемы.* В настоящее время, плавка Ванюкова на Балхашском медеплавильном заводе проводится в условиях недостатка тепла, т.е. полная автогенность процесса не достигается. На родственных предприятиях, эксплуатирующих ПВ для этих целей, используется природный газ, город Балхаш не газифицирован, что не позволяет использовать природный газ для восполнения тепла. Поставляемое сырье не позволяет плавить ее в полностью автогенном режиме, восполнение тепла производится путем введения угля, разработанных еще с участием Андрея Владимировича Ванюкова, разработчиком этой технологии. В этом отношении ПВ на Балхашском медеплавильном заводе является уникальным, что создает возможность для реализации многих идей по замене источников тепла. Нами были проведены работы по определению теплотворных способностей нескольких видов угля и насколько эффективно они справляются с задачей восполнения тепла.

Нами первым этапом было выбрано проведение работ с использованием шунгита и угля, обычно используемого для плавки в ПВ.

#### Внедрение эффективного источника тепла на плавку медного сульфидного сырья в печи ПВ-1 БМЗ.

Этап №1 по внедрению эффективного источника тепла проводился на печи ПВ-1 Балхашского медеплавильного завода с 03.06.19г. по 08.06.19г., за это время было переработано 8178 т. шихты штабеля № 1 за 125 часов. В таблице 1 представлен химический состав штабеля № 1, закладка шунгита составляла 1 % от массы штабеля. Средняя загрузка шунгита в час составляла от 0,6 до 1,0 т/ч в зависимости от производительности.

Таблица 1 - Химический состав штабеля № 1

Cu	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaO	Pb	Zn
18,64	25,86	28,98	11,71	1,10	1,60	2,00

При переработке штабеля №1 было дополнительно переработано 326 т. кварцевого флюса «Вертекс». В таблице 2 представлен химический состав штабеля № 1 с добавлением 326 т. кварцевого флюса.

Таблица 2 - Химический состав штабеля №1 (с добавлением «Вертекса»)

Cu	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaO	Pb	Zn
18,13	25,15	28,29	13,12	1,00	1,50	1,90

Тепловой баланс плавки регулировался подачей угля в диапазоне от 1-2,5 т., среднее значение составило 1т. В период проведения этапа №1 плавка осуществлялась без использования МНУ. Сбой лабораторного комплекса произошел 07.06 в 5:00 и продолжался до 8.06 13:00.

При испытаниях на первом этапе установлено, что при работе на печи ПВ-1 с пониженным уровнем расплава над формами до 600 мм и расходе угля 1-2 т/ч большая часть

## Продолжение А

угля, подаваемого на поверхность расплава сгорает в зоне барботажа. Накопления угля в хвостовой части печи не отмечено.

На протяжении всего первого этапа испытаний пенообразование в шлаковом сифоне практически не отмечалось, что, по-видимому, также связано с оптимизацией условий массообмена при снижении уровня шлаковой ванны над формами, стабильным составом шлака - без его переокисления и повышения содержания кремнезема и равномерным прогревом шлака по всей длине печи. Во время первого этапа не было зафиксировано пробросов и задувов ванны.

Среднее значение экспериментального удельного расхода кислорода за этап составило 220  $\text{Nm}^3/\text{t}$ , обогащение дутья по кислороду 75 %.

На рисунке 1, 2 и 3 представлено изменение содержания меди в штейне, меди в шлаке и кремнезема в шлаке на первом этапе испытаний. В таблице 3 приведены основные показатели процесса на период первого этапа испытаний.



Рисунок 1 - Изменение содержания меди в штейне.

## Продолжение А



Рисунок 2 - Изменение содержания меди в шлаке



Рисунок 3 - Изменение содержания кремнезема в шлаке

Таблица 3 - Основные параметры плавки в период испытаний

Основные параметры	Этап № 1
Кол-во отработанных часов за этап	125
Расход шихты минимальный / средний / максимальный, т/ч	65 / 80 / 101
Расход угля минимальный / средний / максимальный, т/ч	0 / 1,0 / 2,5
Расход шунгита минимальный / средний / максимальный, т/ч	0,6 / 0,8 / 1,0
Расход флюса минимальный / средний / максимальный, т/ч	0 / 0,5 / 7,5

## Продолжение А

Расход кислорода в КВС-1 минимальный / средний / максимальный, $\text{нм}^3/\text{ч}$	13 706 / 20 183 / 24 197
Расход воздуха в КВС-1 минимальный / средний / максимальный, $\text{нм}^3/\text{ч}$	125 / 3 535 / 8 671
Уд. расход кислорода (эксп.) минимальный / средний / максимальный, $\text{нм}^3/\text{т}$	166 / 220 / 295
Температура в сифоне минимальная / средняя / максимальная, $^{\circ}\text{C}$	1170 / 1 232 / 1 271
Температура штейна минимальная / средняя / максимальная, $^{\circ}\text{C}$	1130 / 1170 / 1 250
Теплосъем кессонами минимальный / средний / максимальный, тыс. ккал/ч	5 871 / 8 401 / 9 959
Паросъем КУ минимальный / средний / максимальный, т/ч	12 / 16 / 24
Температура газа на воротнике КУ минимальная / средняя / максимальная, $^{\circ}\text{C}$	921 / 1 023 / 1159
Температура газа на выходе из КУ минимальная / средняя / максимальная, $^{\circ}\text{C}$	321 / 461 / 551
Общая высота ванны минимальная / средняя / максимальная, мм	2 250 / 2 300 / 2 400
Высота пены минимальная / максимальная, мм	Не зафиксировано
Зафиксировано пробросов / задувов	Не зафиксировано
Содержание Си в штейне минимальное / среднее / максимальное, %	43,3 / 52,3 / 59,6
Содержание Си в шлаке минимальное / среднее / максимальное, %	0,56 / 0,79 / 0,99
Содержание БЮг в шлаке минимальное / среднее / максимальное, %	26,4 / 29,4 / 32,6
Содержание компонентов в шихте, %	
Си (PCA / Закладка)	19,3 / 18,6
Si (PCA / Закладка)	30,2 / 28,9
SiO <sub>2</sub> (PCA / Закладка)	11,5 / 11,7

Таким образом, в рамках настоящей работы был реализован первый этап по оптимизации теплового режима плавки в печи Ванзокова (ПВ-1) в условиях отсутствия газификации и полной автогенности процесса. Основное внимание было уделено поиску альтернативных источников тепла — в частности, применению шунгита в сочетании с традиционным углем.

### Ключевые достижения:

- Разработан и опробован режим подачи шунгита (0,6–1,0 т/ч), обеспечивающий стабильное восполнение тепла без накопления углерода в хвостовой части печи;
- Проведена переработка 8178 т шихты за 125 часов при среднем расходе кислорода 220  $\text{нм}^3/\text{т}$  и 75% обогащении дутья;
- Установлена эффективность сгорания топлива в зоне барботажа при снижении уровня шлаковой ванны (до 600 мм над формами);
- Подтверждено отсутствие пенообразования и пробросов ванны, что свидетельствует о стабильности массообмена и термодинамических параметров;

## Продолжение А

• Достигнуто стабильное качество продуктов плавки: содержание меди в штейне достигало 59,6%, а в шлаке снижалось до 0,56%.

**Оценка внедрения:** Внедрение шунгита как дополнительного топлива подтвердило свою эффективность в условиях ограниченного теплового потенциала шихты. Проведённые испытания позволили обеспечить стабильный тепловой режим, снизить потребление традиционного угля, оптимизировать состав шлака и предотвратить аварийные явления, типичные при нестабильной работе печи.

В результате работы в ходе первого этапа опытно-промышленных испытаний удалось поддерживать необходимый для стабильного ведения процесса тепловой баланс плавки за счет эффективного источника топлива - шунгита и угля без использования МНУ и обеспечить необходимые условия работы котла-утилизатора.

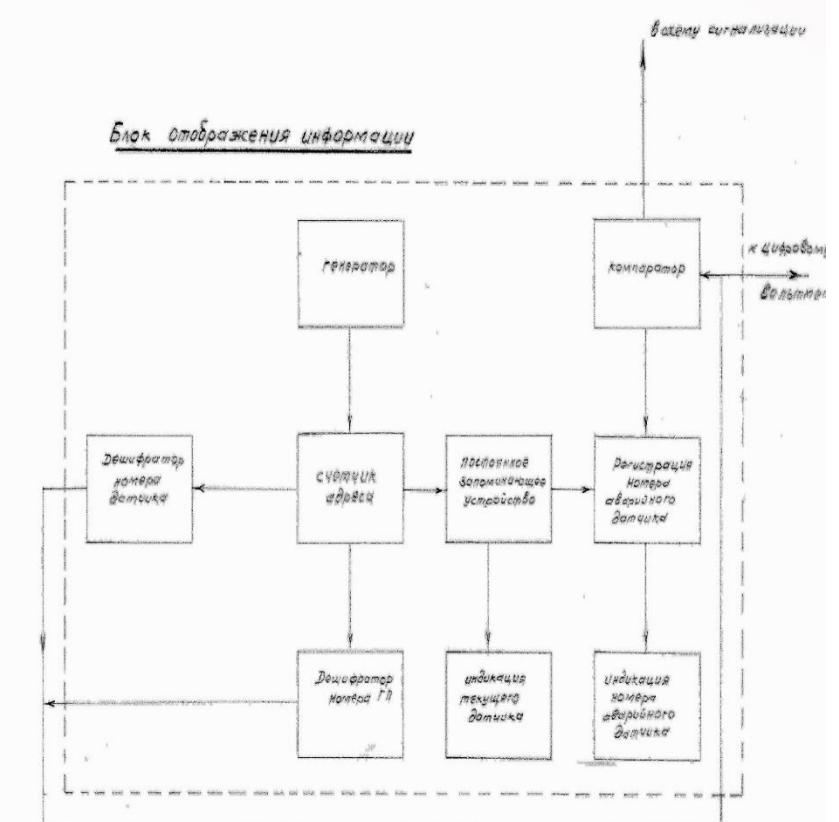
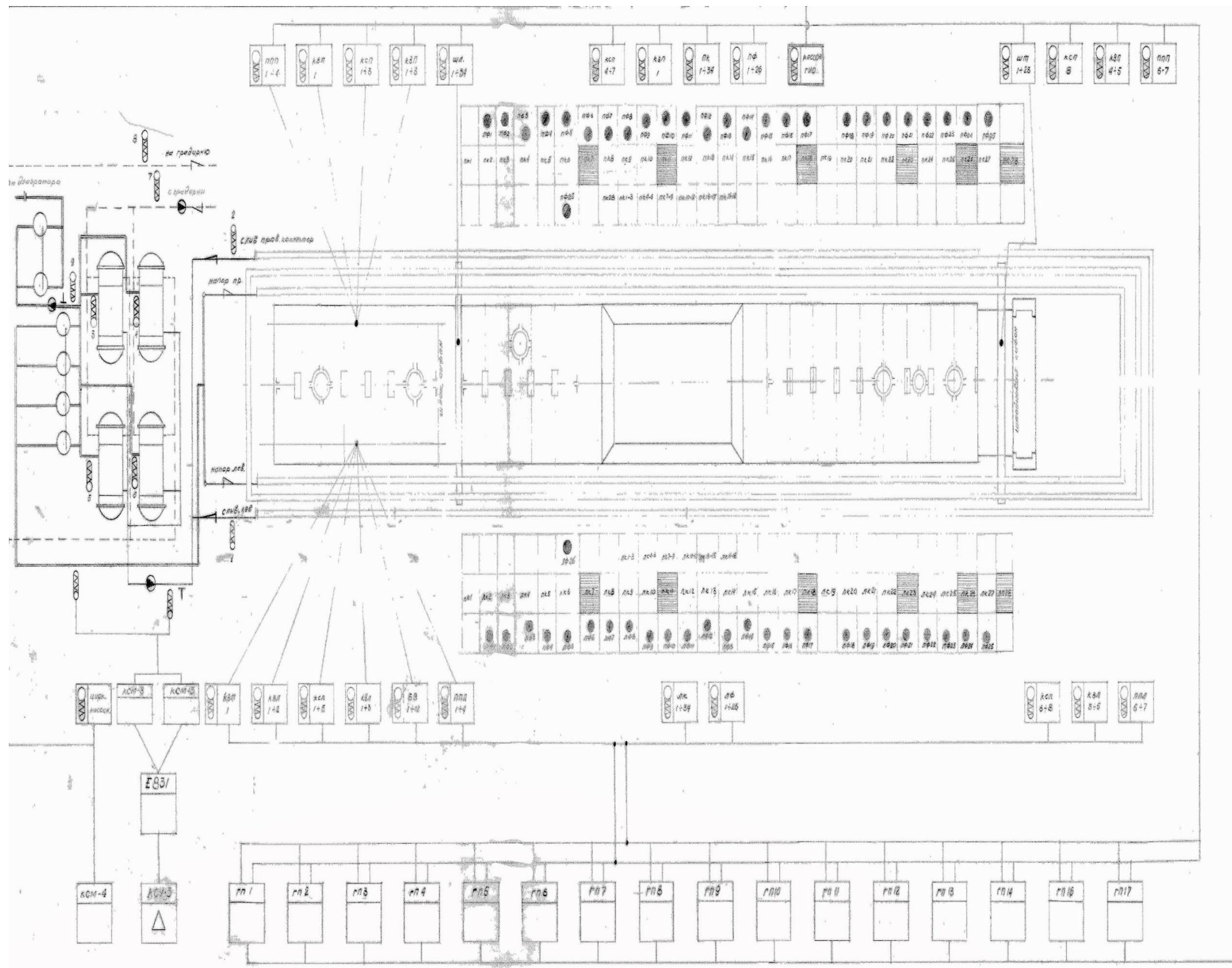
Техническое состояние печи после проведения первого этапа:

- настыль на воротниках котла утилизатора составил 200 мм;
- в шлаковом сифоне износ стен по периметру составил на полкирпича;
- износ столбиков перегородочного окна составил 1,5 - 2 кирпича.

На основе полученных данных рекомендуется проведение дальнейших этапов работ с расширением диапазона используемых добавок и уточнением режимов подачи кислорода и шунгита. Также целесообразно рассмотреть интеграцию локальных источников тепла и автоматизированного контроля теплового баланса печи. Проведённая работа заложила основу для создания устойчивого, термодинамически сбалансированного процесса плавки на ПВ-1 БМЗ. Предложенный метод восполнения тепла с использованием шунгита является технологически оправданным, экономически целесообразным и может служить моделью для аналогичных предприятий, не имеющих доступа к природному газу.

## **Приложение Б**

### **Функциональная схема контроля температуры печи Ванюкова ПВ-1 / ПВ-2**



**Приложение В**  
**Функциональная схема автоматизации водоохлаждаемого свода**

