

На правах рукописи



БУЛАТОВ Константин Валерьевич

**ПЛАВКА-КОНВЕРТИРОВАНИЕ
МЕДНО-СВИНЦОВО-ЦИНКОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ**

05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2016

Работа выполнена в ООО «Медногорский медно-серный комбинат» и ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина».

Научный руководитель: доктор технических наук,
Скопов Геннадий Вениаминович

Официальные оппоненты: **Танутров Игорь Николаевич**,
доктор технических наук, старший научный
сотрудник, ФГБУН Институт металлургии
Уральского отделения Российской академии
наук, главный научный сотрудник лаборатории
электротермии восстановительных процессов;

Бездежский Григорий Наумович,
кандидат технических наук, ООО
«Многопрофильная инжиниринговая иннова-
ционная компания «Энергоцветмет»,
генеральный директор

Ведущая организация: ФГАОУ ВПО «Национальный исследова-
ТЕЛЬСКИЙ технологический университет
«МИСиС»

Защита диссертации состоится 25 марта 2016 года в 15:00 ч на заседании диссертационного совета Д 212.285.05 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», <http://dissovet.science.urfu.ru/news2/>.

Автореферат разослан «__» _____ 2016 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета

Сулицин Андрей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В связи с истощением запасов медных и медно-цинковых уральских месторождений возрастающее внимание уделяется добыче медно-свинцово-цинковых руд Алтайской группы месторождений и их флотационной переработке с получением соответствующих концентратов.

Однако, из-за тонкого взаимного прорастания рудных минералов традиционные методы селективной флотации не позволяют получать качественные одноименные медные, цинковые и свинцовые концентраты; значителен переход цинка и свинца в медный концентрат, увеличиваются объемы образования промпродуктов, возрастают потери ценных металлов с хвостами обогащения.

Переработка получаемых полиметаллических концентратов по стандартным технологиям на металлургических заводах усложняет и удорожает производство, ухудшает качество производимой продукции и снижает степень извлечения металлов из руд.

Одним из вариантов решения проблемы является получение коллективных Cu-Pb-Zn концентратов (промпродуктов) с последующей их пирометаллургической селекцией в процессе специальной переработки.

Пирометаллургической селекцией разработана в 50-е годы прошлого столетия и в течение нескольких лет ее использовали для переработки медно-цинковых концентратов в конвертерах на Кировградском медеплавильном заводе. Технология мало чувствительна к минеральному составу концентратов, однако она не обеспечивает высокую селективность, процесс периодичен, экологически небезопасен и требуется высокая степень переокисления расплавов, что сопровождается повышенным образованием тугоплавких настывлей. Поиск более совершенного варианта пироселекции для переработки Cu-Pb-Zn концентратов представляется актуальным.

Степень разработанности темы исследования

В настоящее время отечественные металлургические предприятия, в основном, имеют «классические» пирометаллургические технологические схемы получения меди, цинка и свинца из монометаллических концентратов, при этом переработка коллективных концентратов сильно осложнена.

Например, в пирометаллургии меди, увеличение содержания цинка осложняет переработку медных концентратов с получением цинковистых тугоплавких шлаков и требует улавливания его возгонов. Свинец ухудшает показатели пирометаллургической переработки медного концентрата снижением качества черновой меди. Поэтому отсутствие комплексной переработки полиметаллических концентратов приводит к значительным потерям цветных металлов. Решением проблем при переработке труднообогатимых полиметаллических руд может быть рациональное сочетание обогащения с получением полиметаллических концентратов и их переработка на металлургических переделах с использованием комбинированных способов.

Цель работы: изучение особенностей возгонки свинца и цинка при пирометаллургической переработке медно-свинцово-цинковых сульфидных концентратов с целью перевода свинца и частично цинка в возгоны для последующей переработки, меди и драгметаллов – в штейновый расплав, и далее, в черновую медь, а остатки цинка и свинца – в шлак, пригодный для фьюмингования.

Задачи исследования:

1. Выявить кинетические особенности протекания процессов возгонки соединений свинца и цинка при пирометаллургической переработке медно-свинцово-цинковых концентратов.

2. Установить оптимальные параметры извлечения свинца и цинка в возгоны при пирометаллургической селекции медно-свинцово-цинковых сульфидных концентратов.

3. Предложить технологию комплексной переработки медно-свинцово-цинковых сульфидных концентратов применительно к процессу совмещенной плавки-конвертирования (СПК).

4. Изыскать способ увеличения стойкости огнеупорной кладки фурменного пояса агрегата СПК.

Научная новизна:

1. Термодинамическим моделированием в системе «концентрат – O_2 – SiO_2 – C » при 1523 К определен равновесный состав возгонов свинца, цинка и их соединений в газовой фазе. При постоянном окислительном потенциале системы (P_{O_2}) в присутствии диоксида кремния снижается переход в газовую фазу свинца и его соединений. При увеличении доли углерода свинец

присутствует в газовой фазе преимущественно в виде сульфида. Возгонка цинка только в виде металла объясняется диссоциацией ZnS. Степень возгонки свинца достигает 80-90%, цинка – до 50%.

2. Удельная скорость возгонки сульфида свинца из медно-свинцово-цинкового концентрата при 1373-1423 К выше, чем из расплава штейна, полученного из этого концентрата. Коэффициент активности сульфида свинца в полиметаллическом штейне при 1373 К равен 0,36, а его активность – 0,05, что свидетельствует о сильной связи PbS с компонентами штейна.

3. Впервые измерен тепловой поток на охлаждаемые элементы при работе плавильного агрегата: на воздушном дутье он составил 28 кВт/м², при обогащении дутья кислородом до 27,4 % об. – 63 кВт/м².

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. С использованием методов математического планирования эксперимента подобраны оптимальные параметры ведения процесса пирометаллургической селекции, при которых обеспечивается максимальное отделение свинца в возгоны, цинка – в шлак, а меди и драгметаллов – в штейновый расплав.

2. На основании результатов лабораторных исследований и опытно-промышленных испытаний выполнен рабочий проект и проведено техническое перевооружение медеплавильного цеха ООО «ММСК», позволившее перерабатывать медно-свинцово-цинковые сульфидные концентраты с использованием процесса совмещенной плавки и конвертирования. В результате переработки свинец и цинк на 88 % и 44 % извлекаются в возгоны, которые удовлетворяют требованиям последующей переработки по стандартным технологиям на цинковых и свинцово-цинковых предприятиях.

3. На агрегате совмещенной плавки и конвертирования установлена и введена в эксплуатацию система водно-вакуумного охлаждения, которая позволила увеличить срок службы огнеупорной футеровки в два раза. Рассчитан дополнительный экономический эффект от внедрения системы ВОПР, который составил 8 млн рублей в расчете на год.

4. Результаты проведенных исследований могут быть использованы при переработке коллективных низкосортных концентратов и промпродуктов, получаемых на обогатительных предприятиях Алтая и Казахстана в процессе флотации трудноразделяемых медно-свинцово-цинковых руд.

Методология и методы диссертационного исследования

При написании диссертационной работы использованы стандартные компьютерные пакеты программ, методы математической статистики, физико-химические методы исследований и анализа сырья, промежуточных и товарных продуктов, отходов производства: спектрофотометрический (спектрограф ИСП-30 с анализатором многоканальным атомно-эмиссионных спектров), рентгенофазовый анализ (Bruker D8 Advance), атомно-абсорбционный анализ (атомно-абсорбционный спектрофотометр nov AA 400), электронно-микроскопический (электронный микроскоп JEM 2100 с приставкой для микроанализа Oxford Inca) и др.

Для определения тепловых потоков на охлаждаемых элементах использовали калориметрический метод.

Полупромышленные и промышленные испытания проводили методом балансовых плавков.

На защиту выносятся:

1. Результаты термодинамической оценки реакций, протекающих при пирометаллургической селекции медно-свинцово-цинковых сульфидных концентратов.

2. Кинетические закономерности возгонки свинца и цинка из медно-свинцово-цинковых сульфидных концентратов и полиметаллических штейнов.

3. Оптимальные параметры пирометаллургической переработки медно-свинцово-цинковых сульфидных концентратов.

4. Результаты расчетов и показатели работы системы водяного охлаждения под разрежением теплонапряженных участков металлургического агрегата.

5. Показатели промышленной переработки медно-свинцово-цинковых сульфидных концентратов с использованием процесса совмещенной плавки и конвертирования.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность обеспечивается воспроизводимостью результатов лабораторных экспериментов, применением математического планирования, аттестованных физико-химических методик анализа при проведении технологических исследований в аккредитованной лаборатории ООО «Медногорский медно-серный комбинат» (ООО «ММСК») с использованием

сертифицированного аналитического оборудования. Текст диссертации проверен на отсутствие недобросовестного заимствования с помощью программы «Антиплагиат. ВУЗ».

Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на Международной научно-практической конференции «Создание высокоэффективных производств на предприятиях горно-металлургического комплекса», г. Екатеринбург, 2013 г.; конгрессе с международным участием и элементами школы молодых ученых «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований», г. Екатеринбург, 2014 г.; Международной научно-практической конференции «Современные тенденции в области теории и практики добычи и переработки минерального и техногенного сырья», г. Екатеринбург, 2014 г.; научно-практической конференции с международным участием и элементами школы молодых ученых «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР», г. Екатеринбург, 2015 г.

Личный вклад соискателя заключается в постановке цели и задач работы, проведении исследований, обработке и анализе результатов, формулировании выводов, написании статей и тезисов докладов.

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 11 научных работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа изложена на 140 страницах машинописного текста, включает 35 рисунков, 19 таблиц и состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 160 источников отечественных и зарубежных авторов и приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, обозначены объект и основные задачи исследований.

В первой главе приведены сведения об источниках образования медно-свинцово-цинковых сульфидных концентратов, проанализированы известные способы вовлечения их в основной цикл медеплавильного производства.

Представлены краткие сведения о наиболее распространенных гидрометаллургических, пиromеталлургических и комбинированных технологиях, показаны основные достоинства и недостатки этих методов.

Проведен анализ современных способов пиromеталлургической переработки полиметаллического сульфидного сырья. Показана предпочтительность их использования, характеризующихся простотой, нечувствительностью к минеральному и фазовому составу, относительно высоким извлечением свинца, меди и драгметаллов в готовую продукцию.

Обоснована перспективность использования пироселекции для переработки медно-свинцово-цинковых сульфидных концентратов, обладающей рядом преимуществ, в сравнении с другими способами.

Во второй главе приведены результаты термодинамических исследований. Расчеты показывают, что при конвертировании полиметаллических штейнов должно протекать совместно окисление FeS и ZnS примерно при равных их концентрациях; возможно окисление PbS, когда его содержание в штейновом расплаве будет больше в 30 раз, чем содержание сульфидов цинка и железа. Окисление сульфида меди возможно после удаления сульфида железа и других сульфидов электроотрицательных элементов штейнового расплава.

Вероятно восстановление магнетита сульфидами железа, свинца и цинка в присутствии кварца. При наличии в системе углерода становится вероятной реакция восстановления магнетита до оксида железа (II) за счёт взаимодействия с монооксидом углерода.

Ферриты цинка могут восстанавливаться сульфидами меди, цинка, железа и свинца, а также монооксидом углерода, причём для сульфидов меди и монооксида углерода вероятность протекания реакций проявляется при температуре выше 1373 К. Ферриты меди имеют высокую вероятность восстановления за счёт вышеназванных восстановителей в рассматриваемом интервале температур. Цинк может восстанавливаться из сульфида и оксида за счёт элементной меди, ее оксида (I), а также сульфида и оксида железа.

На основании результатов термодинамического анализа установлено, что в системе «концентрат – инертный газ» с ростом температуры свинец переходит в газовую фазу преимущественно в виде PbS. Равновесное

распределение свинца и цинка в газовую фазу позволяет ожидать высокого извлечения свинца при температурах выше 1473 К.

В системе «концентрат – O₂» при 1523 К сульфид свинца окисляется до оксида, который частично возгоняется, а в присутствии диоксида кремния частично связывается в силикат свинца. Степень равновесного перехода свинца и цинка в газовую фазу с ростом окислительного потенциала системы носит экстремальный характер в связи с развитием процессов образования не летучих ферритов и силикатов свинца. В системе «концентрат – O₂ – SiO₂» при 1523 К с ростом исходной массы SiO₂ закономерно увеличиваются равновесные массы силикатов цинка, свинца, железа и снижаются феррита цинка, паров цинка и свинца. Возгонка свинца происходит примерно в равной степени в виде паров металла и в сульфидной форме, а цинка – только в виде паров металла. Степень перехода свинца и цинка в газовую фазу с увеличением массы диоксида кремния уменьшается в связи с развитием процессов образования силикатов этих металлов. В системе «концентрат – O₂ – SiO₂ – С» при 1523 К с ростом исходной массы углерода снижаются равновесные массы диоксида серы, магнетита, паров цинка и свинца, силикатов цинка и свинца, а также феррита цинка. При этом закономерно растут равновесные массы оксидов углерода, паров PbS, конденсированных ZnS и PbS. Степень равновесного перехода свинца в газовую фазу с ростом массы углерода не изменяется, а цинка уменьшается в связи со снижением степени окисления сульфида цинка и массы его оксида.

В третьей главе приведены кинетические закономерности возгонки сульфида свинца из полиметаллического концентрата и из штейна. Исследовано влияние продолжительности эксперимента, температуры, расхода восстановителя (кокс) и инертного газа. Использовали нагрев образцов материала в муфельной печи, помещенного в алундовый тигель.

Возгонка свинца из полиметаллического концентрата виде сульфида свинца PbS (наличие его подтверждено рентгенофазовым анализом возгонов), описывается полиномом Протодьяконова (коэффициент корреляции – 0,99):

$$\alpha_{Pb} = 0,033 \cdot (6,345 \cdot 10^{-4} \cdot \tau^2 + 0,634 \cdot \tau + 10,808) \cdot (4,467 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 0,639 \cdot T + 228,648), \quad (1)$$

где α_{Pb} – степень возгонки свинца, %, τ – продолжительность, мин, T – температура, К.

Скорость возгонки сульфида свинца из полиметаллического концентрата описывается уравнением:

$$V=36,38 \cdot \exp\left(-\frac{E_{\text{акт.}}}{RT}\right). \quad (2)$$

На основании полученных зависимостей удельной скорости возгонки сульфида свинца из полиметаллического концентрата от температуры определена экспериментальная энергия активации процесса (119,6 кДж/моль), которая характерна для его протекания в кинетической области (Рисунок 1, прямая 1).

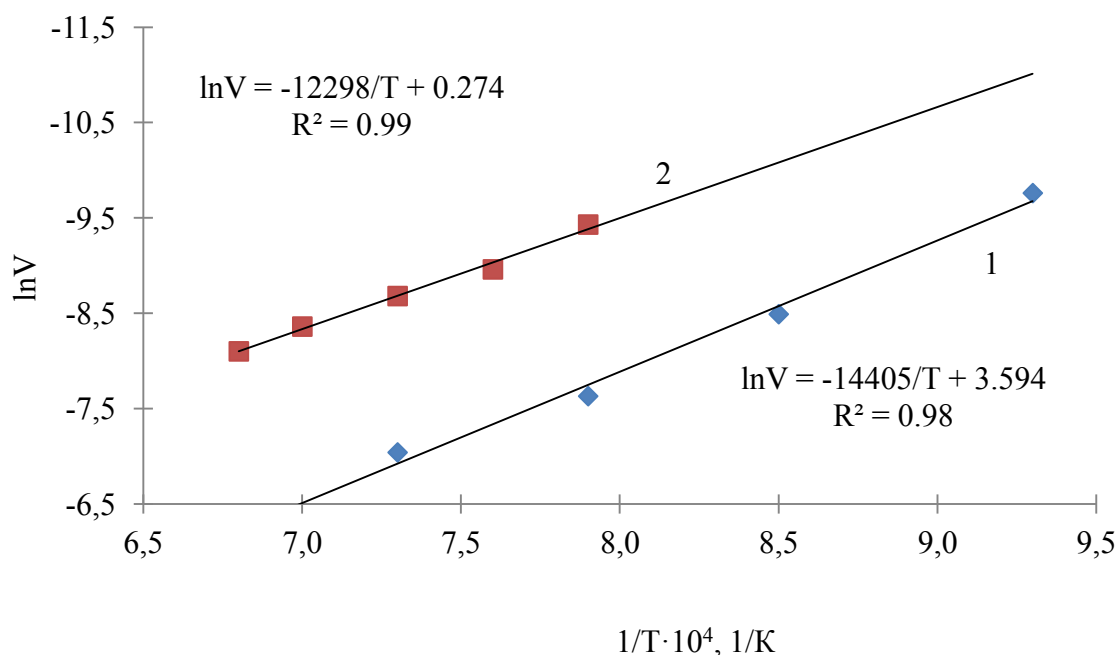


Рисунок 1 – Зависимость логарифма удельной скорости возгонки PbS из концентрата (1) и штейна (2) от обратной температуры

Возгонка свинца из полиметаллического штейна виде сульфида свинца PbS (наличие его подтверждено рентгенофазовым анализом возгонов), описывается полиномом Протодьяконова (коэффициент корреляции – 0,95):

$$\alpha_{\text{Pb}}=0,016 \cdot (-0,015 \cdot \tau^2+2,04 \cdot \tau+17,24) \cdot (-4,23 \cdot 10^{-4} \cdot T^2+1,23 \cdot T-775,96). \quad (3)$$

Экспериментальная энергия активации процесса оказалось равной 102,1 кДж/моль, что также характерно для его протекания в кинетической области (рис. 1, прямая 2).

Скорость возгонки сульфида свинца из полиметаллического концентрата описывается уравнением:

$$V=1,32 \cdot \exp\left(-\frac{E_{\text{акт.}}}{RT}\right). \quad (4)$$

Близость величин экспериментальных энергий активации возгонки сульфида свинца из полиметаллического концентрата и штейна позволяет предположить одинаковый механизм процесса. Однако, удельная скорость возгонки при 1423 К из концентрата ($61,7 \cdot 10^{-7}$ моль/($\text{м}^2 \cdot \text{с}$)) в 6,3 раза превышает ее из штейна ($9,8 \cdot 10^{-7}$ моль/($\text{м}^2 \cdot \text{с}$)), что объясняется, вероятно, образованием растворов с участием PbS – твердых в случае концентрата и жидких – в случае штейна (Рисунок 2).

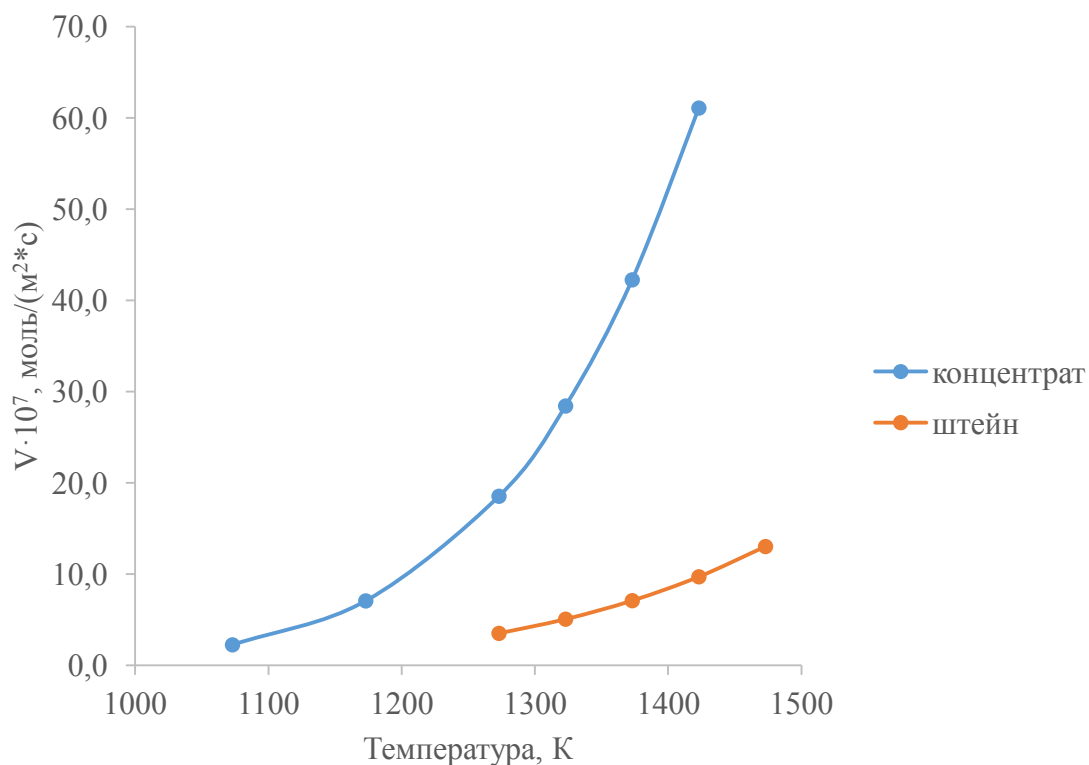


Рисунок 2 – Влияние температуры на скорости возгонки PbS из концентрата и штейна

Для оценки силы связи сульфида свинца с компонентами штейнового раствора исследовали динамическим методом переноса равновесие штейна с газовой фазой, насыщенной парами PbS. С увеличением расхода аргона, давление пара сульфида свинца над штейном закономерно снижается, и полученная зависимость хорошо описывается линейным уравнением, экстраполяция которого на нулевые расходы аргона дает значения давления насыщенного пара сульфида свинца 1121,1 Па.

При мольной доле PbS в штейне, равной 0,14, активность его оказалась равной 0,05, а коэффициент активности 0,36. При этом зависимость давления его пара от температуры имеет вид:

$$\lg P = -11050/T + 10,06. \quad (5)$$

Рассчитанные активность и коэффициент активности PbS с учетом диаграммы PbS-FeS-Cu₂S при 1373 К, оказались равными 0,06 и 0,39 соответственно. Это практически совпадает с полученными нами значениями и указывает на отрицательное отклонение от идеальности поведения сульфида свинца в штейне.

В четвертой главе приведены результаты опытно-промышленных испытаний технологии пирометаллургической переработки коллективного медно-свинцово-цинкового концентрата и результаты ее внедрения в ООО «ММСК».

Испытания проводили на плавильном агрегате совмещенной плавки и конвертирования «Победа» (ПАП) в медеплавильном цехе ООО «ММСК» (г. Медногорск). Усредненный состав концентрата, %: 9,62 Cu; 22,39 Pb; 18,55 Zn; 13,53 Fe; 27,09 S; 2,43 SiO₂; 0,61 CaO. Концентрат поступал с Рубцовской обогатительной фабрики, который шихтовали с отсевом антрацита и известью, затем брикетировали с использованием связующего (ЛСТ). Принципиальная технологическая схема его переработки представлена на рисунке 3.

По результатам испытаний для переработки полиметаллического концентрата были приняты следующие параметры: содержание топлива в брикете не более 7%, извести до 11,0%, расход воздуха до 25 000 м³/час, расход кислорода до 1 000 м³/час, содержание в оборотных шлаках SiO₂ до 21% и CaO до 11%. Содержание свинца и цинка в возгонах – 66 % и 34 %, соответственно; в шлаке: 0,1-5,0 % свинца, 2,4-15,5 % цинка, 2-4 % меди. Извлечение свинца в возгоны составило 72 %, цинка – 40 %.

Проведенные испытания показали приемлемость технологии переработки полиметаллического концентрата на ПАП с получением возгона свинца, который можно перерабатывать на предприятиях по производству цинка, вследствие относительно низкого содержания сурьмы и мышьяка. С учетом полученных результатов, а также проблем, возникших в ходе опытно-промышленных испытаний (высокие температуры отходящих газов и запыленность, повышенная загазованность рабочей зоны, ухудшение работы

электрофильтров, увеличение сопротивления контактных аппаратов цеха серной кислоты), было принято решение о техническом перевооружении медеплавильного цеха.

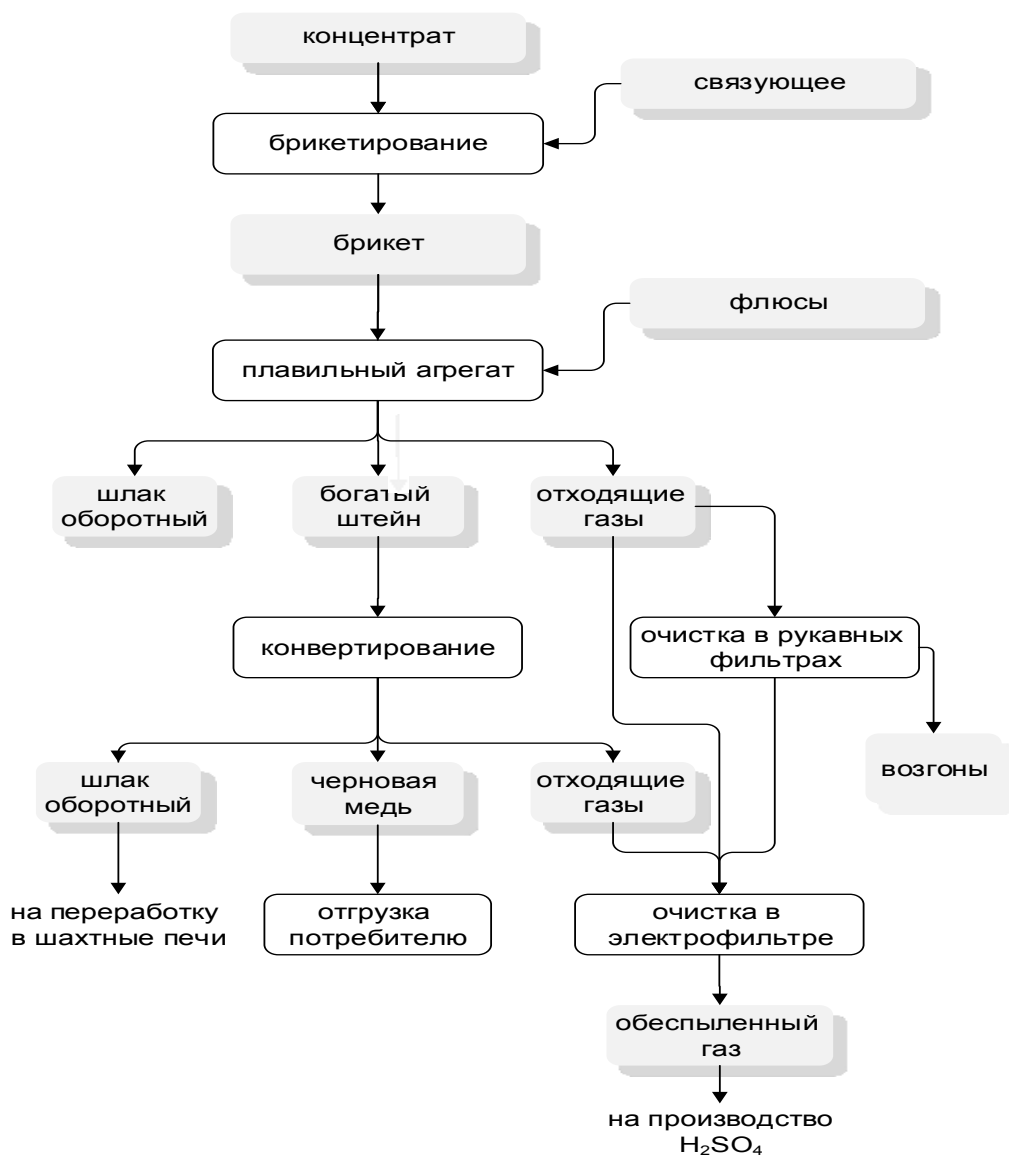


Рисунок 3 – Принципиальная технологическая схема переработки медно-цинкового концентрата

После технического перевооружения медеплавильного цеха и комплексного опробования оборудования была начата промышленная переработка полиметаллического концентрата по технологической схеме, представленной на рисунке 4. Концентрат имел следующий состав, %: 9-13 Cu; 19-24 Pb; 11-21 Zn; 6-20 Fe; 19-31 S; 2-10 SiO₂; 1-2 CaO.

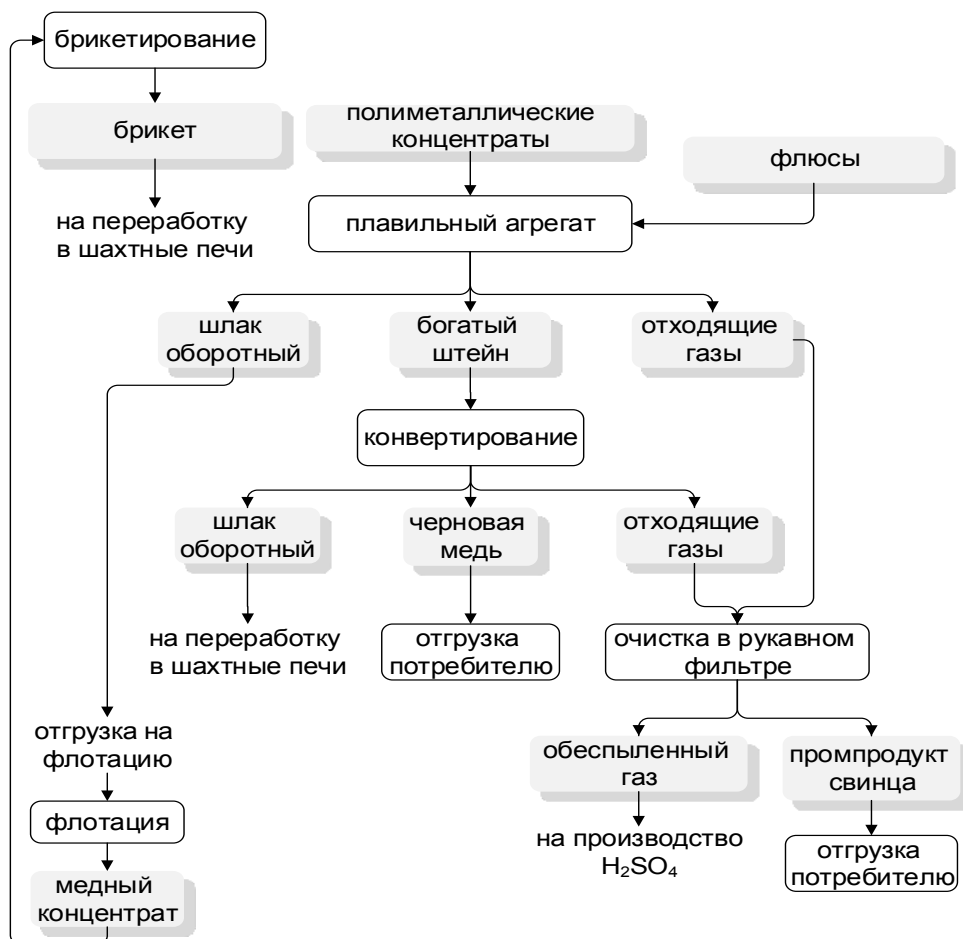


Рисунок 4 – Принципиальная технологическая схема промышленной переработки полиметаллических концентратов

Практика переработки полиметаллических концентратов показала, что их брикетирование не дает значительного эффекта отгонки свинца и цинка. С другой стороны, на стадии загрузки полиметаллических концентратов в ПАП не хватало времени для их плавления из-за недостатка тепла. Поэтому было предложено вместо введения в брикет или шихту отсева антрацита, вдувать углеродсодержащий материал через фурму. В результате были выбраны следующие оптимальные параметры переработки: масса зарядки штейна в ПАП 30 т, расход углевоздушной смеси 0,3-0,35 кг/м³ дутья, расход угля 500 кг/т штейна, масса загрузки полиметаллического концентрата на порцию штейна 60-100 т, масса загрузки кварца после расплавления концентрата 10-16 т, извести 3-4 т. Продувку вели до получения шлака (2-5 % Cu) и богатого штейна (75-78 % Cu). После слива шлака и штейна в агрегате необходимо отставлять

30-35 т расплава (для возобновления продувки) и весь цикл, начиная с подачи углевоздушной смеси, повторять снова.

Среднее содержание диоксида серы в отходящих газах составило 7-9 % об. В процессе переработке не наблюдалось гетерогенизации расплава, в агрегате не отмечено накопления тугоплавких непроплавленных остатков. Существенного изменения состава шлаков ПАП не зафиксировано.

Извлечение свинца и цинка в возгоны увеличилось до 84 % и 44 % соответственно. Состав полученных возгонов представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Состав возгонов свинца

Наименование	Содержание, %						
	Pb	Zn	Cu	S	As	Sb	H ₂ O
По ТУ 1725–008–41848759–2010	не менее 33	не более 18	не более 2	не более 9	не более 0,4	не более 0,06	не более 3,0
Полученный промпродукт свинца	47,3	15,2	0,57	10,3	0,5-1,8	до 0,08	0,5

Полученные оптимальные параметры позволили организовать промышленную переработку полиметаллических концентратов производства ОАО «Сибирь-Полиметаллы» на ПАП с приемлемыми технологическими показателями и получением возгонов, которые могут перерабатываться на предприятиях цинковой отрасли.

Расчеты по эффективности переработки полиметаллического сырья были выполнены за период, равный году, в условиях выхода на полную проектную мощность. Планировалось получить 32 632 т промпродукта свинца, с содержанием в нем цинка 12,1% (3 958 т) и с содержанием свинца 42,5% (13 870 т). Прямые затраты медеплавильного цеха увеличивались на 126 632 тыс. руб. Годовая выручка от реализации полученных продуктов составила 260 530 тыс. руб. Годовой эффект от переработки полиметаллического сырья составил 133 898 тыс. руб. Для реализации данного проекта капитальные вложения составили 729 296 тыс. руб.; срок окупаемости – 5,4 года.

В пятой главе приведены результаты технологических исследований по увеличению срока службы огнеупорной футеровки. Вдувание углеродсодержащего материала при переработке полиметаллических концентратов позволило повысить интенсивность процесса, однако это привело к сокращению срока службы огнеупорной футеровки (менее трех месяцев). Анализ способов увеличения ее кампании показал, что результат достигается за счет охлаждения самого теплонапряженного участка – фурменной зоны металлургического агрегата и образованием гарнисажа. Однако применение охлаждения сдерживается взрывоопасностью при контакте воды с расплавами.

Из известных взрывобезопасных систем для ПАП нами предложено использовать взрывобезопасную систему водяного охлаждения под разрежением (ВОПР). Для установки системы на агрегате для циркуляции воды были приняты трубчатые элементы; охлаждаемые элементы устанавливаются ниже и выше оси фурм, охватывая область максимального разгара футеровки ПАП. Элементы устанавливались между кожухом конвертера и огнеупорной кладкой. Образующиеся зазоры заполнялись теплопроводной огнеупорной пастой (мастикой). Между рядами огнеупоров было установлено оребрение, улучшающее контакт за счет крепления с наружной поверхностью элемента. Принципиальная схема системы ВОПР представлена на рисунке 5.

На схеме охлаждаемые элементы плавильного агрегата (Пл) представлены совокупностью параллельных линий. Начальным сечением I-I каждого тракта является поверхность воды в питающей емкости (ПЕ), а выход отводящих линий элементов в вакуумном шкафу – сечением II-II. Состояние вакуумного шкафа (ВШ), т.е. разрежение в нем и уровень жидкости, определяются суммарными свойствами системы трактов – блоком всасывающей линии (1), блоком отводящей линии (2). Насосная установка (Н) является движущей силой потока и определяет согласование сопротивления трактов и характеристики насосной установки. При стабильной работе системы расход воды, определяемый напорной характеристикой насоса, всегда равняется суммарному расходу воды через все охлаждаемые элементы.

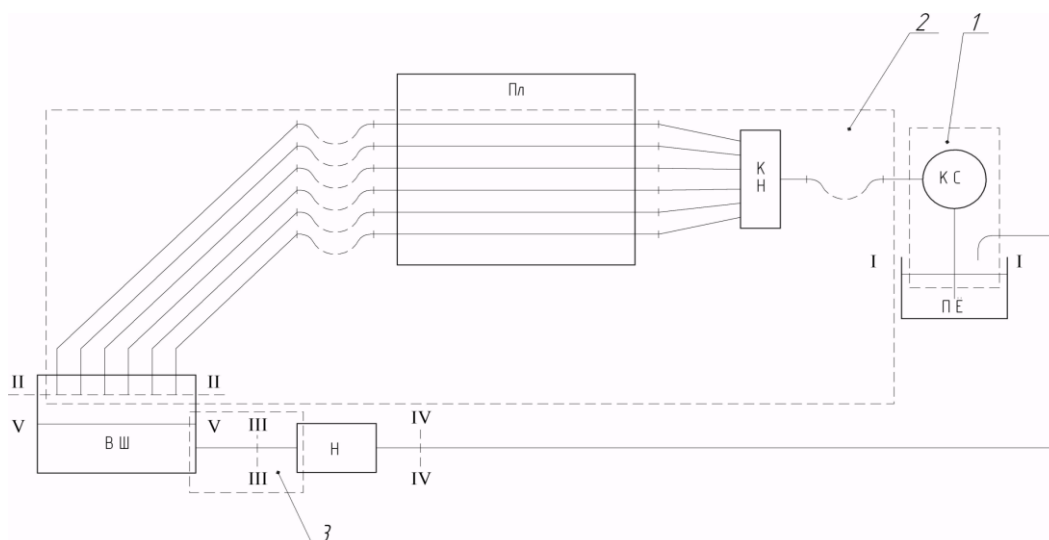


Рисунок 5 – Принципиальная схема ВОПР ПАП

Для определения уровня теплового воздействия на элементы использовался калориметрический метод. Тепловой поток на элемент ($\text{кВт}/\text{м}^2$) рассчитывали по формуле:

$$q = \frac{Q_i}{F_{\text{эл}}}, \quad (6)$$

где Q_i – тепловой поток на элемент, $\text{Вт}/\text{м}^2$, $F_{\text{эл}}$ – площадь поверхности теплообмена элемента.

Максимальный тепловой поток в пусковой период зафиксирован на четвертом элементе располагающемся на высоте 325 мм выше оси фурм, который составил $43,2 \text{ кВт}/\text{м}^2$. На другие элементы уровень теплового потока для данного периода колебался в пределах $27,0\text{-}28,3 \text{ кВт}/\text{м}^2$. Тепловой поток в период простоя агрегата изменялся в диапазоне $4,8\text{-}10,8 \text{ кВт}/\text{м}^2$. Переход агрегата на работу с обогащенным по кислороду дутьем ($24\text{-}27,4 \%$ об.) привел к росту тепловой нагрузки до $62,8 \text{ кВт}/\text{м}^2$. Через 60 суток работы конвертера с охлаждением фурменной стенки толщина оставшегося слоя огнеупора составила 360-400 мм, а максимальный уровень тепловой нагрузки – $85 \text{ кВт}/\text{м}^2$.

Система ВОПР при испытаниях обеспечила взрывобезопасность эксплуатации конвертера при прогаре охлаждаемых элементов. По итогам работы ПАП с системой ВОПР, кампания фурменного пояса возросла до 6 месяцев и 23 суток, исключен один ремонт по замене футеровки фурменного пояса ПАП. В таблице 2 представлены сравнительные данные по работе на ПАП с установленной системой ВОПР.

Таблица 2 – Сравнение показателей эксплуатации ПАП с ВОПР

Наименование	Ед. изм.	без ВОПР	с ВОПР
Продолжительность работы	сут.	107	205
Переработано штейна	т	12117	36363
Переработано шихты	т	20899	47636
Производительность по штейну	т/сут.	113	177
Производительность по шихте	т/сут.	195	232
Начальная толщина фурменного пояса	мм	520	520
Средняя толщина фурменного пояса после выхода агрегата в ремонт	мм	273	188
Скорость износа футеровки в районе фурменного пояса	(мм/сут.)	2,3	1,6

Из представленных данных следует, что внедрение системы ВОПР, при увеличении производительности по переработанному штейну (на 56 %), шихте (на 19 %), позволило снизить скорость износа футеровки почти на 30 %.

В результате эксплуатации системы ВОПР ПАП достигнуто снижение затрат на 6 922 тыс. рублей, в т.ч. за счет устранения текущих ремонтов (2 920 тыс. рублей на огнеупор). За счет сокращения времени простоя агрегата, дополнительный доход от переработки клинкера составил 3 182 тыс. рублей. Экономический эффект от внедрения системы ВОПР с учетом налога на прибыль 8,1 млн рублей. При капитальных вложениях 5,3 млн рублей простой срок окупаемости составляет 0,7 лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Тенденция освоения добычи полиметаллических руд и отсутствие приемлемой технологии их обогащения приводят к увеличению производства коллективных медно-свинцово-цинковых концентратов и промпродуктов.

2. Проблема переработки таких концентратов может быть решена за счет использования пироселекции: перевод свинца в возгоны, цинка – частично

в возгоны, частично в шлак, меди, золота и серебра в черновую медь в условиях процесса совмещенной плавки-конвертирования.

3. Термодинамическими расчетами показана возможность достижения степени возгонки свинца на уровне 80-90%, цинка до 50%, при этом:

– возгонка свинца в рассмотренных системах осуществляется в сульфидной, окисленной и металлической формах, соотношение между которыми зависит от окислительного потенциала системы. Чем он выше, тем больше доля в газовой фазе оксида свинца;

– при постоянном окислительном потенциале введение в систему диоксида кремния снижает выход в газовую фазу оксида свинца и общий переход свинца в газовую фазу;

– в присутствии углерода снижается окислительный потенциал системы, а свинец возгоняется, преимущественно, в сульфидной форме;

– цинк возгоняется из расплава только в виде металла и, в дальнейшем, окисляется в газовой фазе.

4. Удельная скорость возгонки сульфида свинца из медно-свинцово-цинкового концентрата при 1373-1423 К в 6 раз выше, чем из штейна (образуются устойчивые свинецсодержащие фазы при расплавлении концентрата), механизм возгонки из концентрата и штейна предположительно одинаков. Коэффициент активности сульфида свинца в медно-свинцово-цинковом штейне при 1373 К равен 0,36, а активность 0,05, что свидетельствует о сильной связи PbS с компонентами штейна. Для увеличения степени возгонки свинца из концентрата следует создавать условия для быстрого его нагрева до максимально возможной температуры без расплавления.

5. Определены оптимальные параметры промышленной переработки медно-свинцово-цинкового концентрата в агрегате СПК, которые позволили извлекать в возгоны 84 % Pb и 44 % Zn, получать черновую медь не ниже марки МЧ5 и возгоны, удовлетворяющие требованиям цинковых заводов.

6. Показана возможность использования взрывобезопасной системы охлаждения (ВОПР) для увеличения кампании агрегата СПК.

7. Определены параметры системы ВОПР и охлаждаемых элементов для разработки рабочего проекта системы охлаждения агрегата СПК.

8. Разработан новый способ футеровки с оребрением фурменной зоны агрегата СПК с системой ВОПР.

9. Проведены промышленные испытания системы ВОПР с новым видом футеровки фурменной зоны и определены ее тепловые характеристики. Максимальный уровень тепловой нагрузки соответствует 320-325 мм выше оси фурм.

10. Испытания охлаждающих элементов системы ВОПР в фурменной зоне промышленного агрегата СПК показали, что применение их совместно с футеровкой с оребрением позволяет увеличить кампанию агрегата в среднем более чем в два раза.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования:

- 1 Оптимизация температурного режима.
- 2 Снижение потерь меди и цинка со шлаками.
- 3 Организация непрерывного режима конвертирования.
- 4 Повышение стойкости футеровки фурменного пояса.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК:

1. Булатов К.В. Переработка полиметаллических концентратов в плавильном агрегате «Победа» ООО «Медногорский медно-серный комбинат» / К.В. Булатов, Г.В. Скопов, Д.Ю. Скопин, С.А. Якорнов // Цветные металлы. – 2014. – № 10. – С. 39-44 (0,38 п.л. / 0,15 п.л.).

2. Булатов К.В. Скорости возгонки сульфида свинца из полиметаллического концентрата и полученного из него полиметаллического штейна / Г.В. Скопов, К.В. Булатов, Д.Ю. Скопин // Metallurg. – 2015. – № 2. – С. 66-68 (0,2 п.л. / 0,1 п.л.).

Bulatov K.V. The Rate of Lead Sulfide Distillation from Polymetal Concentrate and Polymetal Matte Prepared from it / G.V. Skopov, K.V. Bulatov, D.Y. Skopin // Metallurgist. – 2015. – Volume 59. – Issue 1. – P. 168-176 (0,57 п.л. / 0,25 п.л.).

3. Булатов К.В. Поиск оптимального распределения кислорода в системе плавильных агрегатов / Н.Г. Агеев, В.П. Жуков, К.В. Булатов, Д.Ю. Скопин // Цветные металлы. – 2013. – № 11. – С. 44-48 (0,3 п.л. / 0,15 п.л.).

Патенты:

4. Патент 2520292 Российская Федерация, МПК С 22 В 15/06, С 22 В 15/02. Способ переработки сульфидных медно-свинцово-цинковых материалов [Текст] / Скопов Г.В., Старков К.Е., Харитиди Г.П., Якорнов С.А., **Булатов К.В.**; заявитель и патентообладатель ООО «УГМК-Холдинг». – Заявка № 2012152729/02; заявл. 06.12.2012; опубл. 20.06.2014; Бюл. N 17.

5. Патент 2487947 Российская Федерация, МПК С 21 В 7/10, F 27 В 1/24, F 27 D 9/00. Способ охлаждения узлов металлургических печей и устройство для его осуществления [Текст] / Якорнов С.А., **Булатов К.В.**, Скопин Д.Ю., Сорокин С.В., Азнабаев Р.А., Барсуков Н.М.; заявитель и патентообладатель ООО «ММСК». – Заявка № 2011148191/02; заявл. 25.11.2011; опубл. 20.07.2013; Бюл. N 20.

6. Патент 2555697 Российская Федерация, МПК F 27 D 1/12. Футеровка стенки металлургической печи [Текст] / Якорнов С.А., **Булатов К.В.**, Скопин Д.Ю., Исхаков И.И., Лепин С.А., Барсуков Н.М.; заявитель и патентообладатель ООО «ММСК». – N 2013146135/02; заявл. 15.10.2013; опубл. 10.07.2015; Бюл. N 19.

Другие публикации:

7. Булатов К.В. Система охлаждения металлургических узлов под давлением ниже атмосферного / К.В. Булатов, Д.Ю. Скопин // Промышленность и безопасность. – 2014. – № 7. – С. 56-57 (0,12 п.л. / 0,06 п.л.).

8. Булатов К.В. Переработка полиметаллических концентратов на плавильном агрегате «Победа» в ООО «ММСК» / Д.Ю. Скопин, С.А. Якорнов, К.В. Булатов // Сборник докладов международной научно-практической конференции «Создание высокоэффективных производств на предприятиях горно-металлургического комплекса». – Екатеринбург: Уральский рабочий, 2013. – С. 113-116 (0,25 п.л. / 0,12 п.л.).

9. Булатов К.В. Совместная переработка медных и полиметаллических концентратов на плавильном агрегате «Победа» с системой охлаждения фурменного пояса / К.В. Булатов, Д.Ю. Скопин, С.А. Якорнов // Труды конгресса с международным участием и элементами школы молодых ученых

«Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований». – Екатеринбург: УрО РАН, 2014. – С 476-480 (0,3 п.л. / 0,15 п.л.).

10. Булатов К.В. Практика переработки полиметаллических концентратов в ООО «ММСК» / Д.Ю. Скопин, К.В. Булатов, Г.П. Харитиди, Г.В. Скопов, С.А. Якорнов // Материалы международной научно-практической конференции «Современные тенденции в области теории и практики добычи и переработки минерального и техногенного сырья» (г. Екатеринбург, 5-7 ноября 2014 г.). ОАО «Уралмеханобр». – Екатеринбург: Издательство УМЦ УПИ, 2014. – С. 170-176 (0,43 п.л. / 0,2 п.л.).

11. Булатов К.В. Основы теории и эксплуатации системы охлаждения фурменного пояса конвертеров / К.В. Булатов, Д.Ю. Скопин, С.А. Якорнов, Н.М. Барсуков // Труды научно-практической конференции с международным участием и элементами школы молодых ученых «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР». – Екатеринбург: Уральский рабочий, 2015. – С. 399-403 (0,3 п.л. / 0,15 п.л.).