

На правах рукописи



**КОРОЛЬ Юрий Александрович**

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФУРМ В ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКЕ  
ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ КАМПАНИИ КОНВЕРТОРА**

05.16.02 - Metallurgy of black, colored and rare metals

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург - 2018

Работа выполнена на кафедре металлургии цветных металлов Института новых материалов и технологий ФГАОУ ВО "Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина".

**Научный руководитель -** член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор,  
**НАБОЙЧЕНКО** Станислав Степанович

**Официальные оппоненты:** **ЦЫМБУЛОВ** Леонид Борисович,  
доктор технических наук, профессор, ООО "Институт Гипроникель", г. Санкт-Петербург, заведующий лабораторией пирометаллургии;

**РОВНУШКИН** Виктор Аркадьевич,  
кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ОАО "Уральский институт металлов", г. Екатеринбург, советник научного руководителя института

**Ведущая организация –** ФГБОУ ВО "Санкт-Петербургский горный университет"

Защита диссертации состоится " 14 " декабря 2018 г. в 17:00 ч на заседании диссертационного совета Д 212.285.05 на базе ФГАОУ ВО "Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина" по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО "Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина", <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?id=51&rid=285584>

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Андрей Владимирович Сулицин

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы диссертационного исследования**

Развитие космонавтики, самолетостроения, приборостроения, химии и нефтехимии, автомобилестроения и строительства, оборонных отраслей и медицины невозможно без использования цветных металлов. Ежегодно возрастающий мировой спрос на никель и кобальт стимулируют компании развивать и совершенствовать способы и методы добычи и переработки металлов, при этом уровень затрат на производство становится определяющим в выборе разрабатываемых типов руд и используемых технологических решений.

После пирометаллургической переработки окисленных никелевых руд, образуется промежуточный продукт – штейн, который далее, как правило, конвертируется для получения готовой продукции. При этом выделяется значительное количество тепла, приводящее к интенсивному разрушению огнеупорной футеровки конвертора. Характерным отличием процессов конвертирования никелевых штейнов является работа на шлаки с содержанием  $\text{SiO}_2$  24-28%. При таком содержании оксида кремния исключается образование защитного гарнисажа на огнеупорной футеровке конвертора, что, в свою очередь, ограничивает его рабочую кампанию до 5-12 суток. Низкая кампания и необходимость периодического ремонта оборудования с применением дорогостоящих огнеупоров, наряду с соответствующими трудозатратами, высокими расходами на топливо и электроэнергию, приводят к удорожанию конверторного передела и снижению рентабельности производства цветных металлов с использованием пирометаллургической технологии.

### **Степень разработанности темы исследования**

Кампания никелевого конвертора ограничивается, в основном, временем работы фурменного пояса и в связи с этим все исследования в этой области направлены на решение проблемы защиты футеровки этой части конвертора. Данный вопрос является предметом изучения как отечественных специалистов, так и ученых за рубежом. Исследования в области теории и практики конвертирования никелевых, медных и медно-никелевых штейнов рассмотрены в работах Смирно-

ва В.И., Захарова Б.Н., Воробьева В.А., Пименова Л.И., Михайлова В.И., Барсукова Н.М., Русакова М.Р., Гальнбека А.А., Бабаджана А.А., Кашеева И.Д., Стрелова К.К., J. Kapusta, A.A. Bustos, A. D. Resende, Старых В.Б., Цемехмана Л.Ш., G.Akdogan, G.A. Bezuidenhout, Baojun Zhao, Zhixiang Cui, Zhi Wang, B. Salt, E. Cerilli, Kaixi Jiang, Lan Li, Yaping Feng, Haibei Wang, Bang Wei, Шалыгина Л.М., Живова М.З., Кормилицына С.П., R.G.H. Lee, Paul E. Queneau, Reinhardt, Guy Savard, Резника И.Д., Рябко А.Г., Недвецкого Е.П., Хомченкова Б.М., Арефьева К.М., Ежова Е.И., Певзнера М.И. и многих других.

Практика действующих предприятий показывает, что наибольший эффект в увеличении длительности кампании конверторов достигнут за счет использования хромитопериклазовых огнеупоров, кладки огнеупора с тепловыми зазорами, применения закладных кессонов с охлаждением водой под разряжением (ВОПР), организации работ по уменьшению простоя конверторов и обогрева футеровки в период простоя. Увеличение кампании конверторов на 15-20% было получено при использовании дутья, обедненного по кислороду до 17%.

Однако ни одно из перечисленных мероприятий не привело к существенному росту кампании, которая остается на уровне не выше 12 суток для никелевых конверторов и 45-90 дней для медных и медно-никелевых.

**Цель работы** - повысить кампанию работы конверторов при переработке расплавов тяжелых цветных металлов.

**Научная идея** заключается в смещении высокотемпературного фокуса дутья от огнеупорной футеровки вглубь ванны конвертора за счет ограничения контакта кислорода дутья с расплавом в начальной стадии проникновения струи в ванну и использования защитного газа (азота, природного газа) вокруг воздушной струи.

**Предметом исследования** является теоретическое обоснование и разработка новой конструкции фурменного прибора для конвертора, обеспечивающего эффективную защиту огнеупорного кирпича от воздействия высоких температур и агрессивного расплава сульфидов цветных и черных металлов.

**Объект исследования** – технологические процессы конвертирования медных, медно-никелевых и никелевых штейнов и оборудование для их реализации.

**Задачи исследования:**

1. Выполнить анализ решений и способов защиты футеровки в пирометаллургии и выделить основные моменты, которые можно использовать применительно к конверторам для переработки никелевого штейна.
2. Выполнить анализ существующих методик по расчету устройств для решения поставленных задач и уточнить (дополнить) методику расчета применительно к условиям действующих производств при переработке штейнов цветных металлов.
3. Разработать конструкцию фурменного прибора для конвертора с учетом и на основании теоретических обобщений и уточненных методик расчета.
4. Провести адаптацию новой конструкции фурмы к условиям действующего производства.
5. Провести полупромышленные и промышленные испытания с целью определения влияния новой конструкции фурмы на технико-экономические показатели действующего производства.

**Научная новизна и теоретическая значимость:**

1. Разработана методика и математическая модель расчета фурм в защитной оболочке из различных газов применительно к процессам конвертирования.
2. В результате промышленных испытаний фурмы в защитной оболочке из природного газа получены новые зависимости распределения цветных металлов между жидкими фазами шлака и штейна.
3. Определены условные константы равновесия распределения металлов в расплавах при использовании в качестве защитной среды различных газов.
4. Предположен механизм воздействия защитной среды на ход процессов конвертирования, поясняющий рост стойкости огнеупоров фурменного пояса и изменения констант равновесия реакций взаимодействия никеля, меди и кобальта между штейном, сульфидной массой и конверторными шлаками.

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 05.16.02 "Металлургия черных, цветных и редких металлов"

**Практическая значимость** выполненных исследований заключается в обосновании новой конструкции фурмы в защитной оболочке и разъяснения механизма воздействия защитной оболочки из азота и природного газа на процессы конвертирования цветных металлов в части защиты огнеупорной футеровки и распределения цветных металлов между штейном и шлаком.

Разработана конструкция фурменного прибора, позволяющего реализовать подачу воздушного дутья в защитной оболочке из природного газа в расплав при использовании дутья низких энергетических параметров.

Даны рекомендации по практическому использованию фурм в защитной оболочке для конверторов, перерабатывающих медные, медно-никелевые и никелевые штейны.

Предложен способ повышения эффективности обеднения конверторных шлаков методом перемешивания фаз и использованием фурм в защитной оболочке, где в качестве защитного газа используется природный газ.

Разработанная конструкция фурменных приборов была внедрена на 13 конверторах действующего производства по переработке окисленных никелевых руд. Промышленные испытания и последующая эксплуатация конверторов с фурмами в защитной оболочке показали рост кампании конверторов набора и варки файнштейна с 5-8 суток до 16-34 суток. Конвертора подготовки и варки автоклавной массы увеличили свою работу с 13-15 до 22-39 суток. Конвертора обеднения конверторного шлака продлили кампанию с 50 до 70 суток на азоте и до 105 суток на природном газе.

Экономическая оценка внедрения фурм в защитной оболочке на действующем предприятии подтверждена за счет увеличения кампании работы конверторов набора, обеднения и варки автоклавной массы.

### **Методология и методы исследований**

Теоретической и методологической основой диссертационной работы явились исследования отечественных и зарубежных авторов в области современных способов защиты огнеупорной футеровки конверторов, разработки методов расчета конструкций фурменных приборов конвертора, исследований в области рас-

пределения цветных металлов между жидкими фазами при пирометаллургической переработке расплавов.

В диссертации применялся системный подход к анализу используемых методов расчета фурменных приборов конвертора. Предложенный способ расчета, основывается на использовании общедоступного программного обеспечения на базе Microsoft Office Excel.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Разработка методики и математической модели расчета фурм в защитной оболочке для горизонтальных конверторов по переработке штейнов.
2. Разработка конструкции фурменного прибора, позволяющего реализовать подачу воздушного дутья в защитной оболочке в расплав при использовании дутья низких энергетических параметров.
3. Повышение эффективности процессов обеднения конверторных шлаков при использовании в качестве защитной среды природного газа. Расчет теоретических констант равновесия распределения металлов в расплавах и сопоставление их с данными, полученными в процессе конвертирования никелевых штейнов при использовании в качестве защитной среды азота и природного газа.
4. Механизм влияния защитной среды на ход процессов конвертирования, поясняющий рост стойкости огнеупоров фурменного пояса и изменения констант равновесия реакций взаимодействия никеля, меди и кобальта между штейном, сульфидной массой и конверторными шлаками.

**Степень достоверности результатов** научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в диссертации, обеспечивается применением теоретических основ физико-химических пирометаллургических процессов, математическими методами исследований на базе современного программного обеспечения, корректным использованием достаточного объема аналитической и статистической информации, сопоставлением теоретических обобщений и выводов с их практическим использованием при конвертировании цветных металлов. Результаты практического применения разработанной конструкции фурменного прибора подтвердили все теоретические предположения и показали преимущество иссле-

дуемой фурмы при сопоставлении с ранее достигнутыми показателями на предприятиях России и за рубежом.

### **Апробация работы**

Основные положения диссертационной работы использованы при разработке новой конструкции фурменного прибора и последующего его внедрения на действующем производстве при переработке окисленных никелевых руд.

Результаты теоретических исследований и практического внедрения обсуждались на заседаниях НТС комбината "Южуралникель" (июль 1984 г.), г. Орск; на конференции молодых специалистов никелевой отрасли (май-июнь 1985 г.), г. Орск; на заседании Совета ВОИИР комбината "Южуралникель" (март 1987 г.), г. Орск; на конференции рационализаторов и изобретателей при Оренбургском общественном институте патентоведения (май 1987 г.), г. Орск.

**Личный вклад соискателя** состоит в теоретическом обосновании, формировании цели и направлений исследований, непосредственном участии руководстве разработкой новой конструкции фурменного прибора и внедрении установки на действующем производстве; анализе и обобщении полученных результатов, подготовке научных публикаций.

### **Публикации**

Основные положения диссертации нашли отражение в 5 публикациях в рецензируемых журналах, определенных ВАК.

### **Объем и структура работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 128 наименований, изложена на 119 страницах машинописного текста и содержит 28 рисунков, 15 таблиц и 63 формулы.

Автор выражает **благодарность** коллегам по совместной работе в плавильном цехе комбината "Южуралникель" в 1983-1989 гг. Пичугину В.В., Денисову В.Н., Труханкину А.В., Пашковскому А.А., Иванову Т.Т., Бурочкину К.В., сотрудникам кафедры МЦМ (УрФУ), сотрудникам института Гипроникель д.т.н. Русакову М.Р., к.т.н. Барсукову Н.М., д.т.н. профессору Цемехману Л.Ш. за ценные замечания и помощь в выполнении работы и подготовке диссертации.



## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель работы, задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, приведены положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** выполнена оценка современного состояния процессов конвертирования никелевых штейнов, в том числе: рассмотрены теоретические вопросы конвертирования; составы сырья и продуктов переработки; выделены особенности конвертирования никелевых в сравнении с медными штейнами; рассмотрена практика процессов конвертирования и обеднения шлаков; определены причины, влияющие на кампанию конверторов и сделан обзор мероприятий, направленных на увеличение кампании оборудования. По результатам оценки последствий термического, химического и механического воздействия на фурменный пояс конвертора, намечены пути повышения эффективности работы оборудования с использованием фурм в защитной оболочке из азота и природного газа.

**Вторая глава** посвящена анализу существующих методик расчета фурм в защитной оболочке, выявлению особенностей их применения и возможности адаптации для условий действующих предприятий медно-никелевой отрасли.

Главная особенность существующих методик расчета конструкций фурм для продувки расплавов заключается в их применении для конкретных условий технологического процесса (конвертирование стали, переработка свинцового, медного сульфидного сырья и тд) с использованием ряда критериев (числа Маха, Нуссельта, Рейнольдса, Прандтля и др).

По мнению автора, представленные методики расчета фурмы в защитной оболочке или не применимы для процессов конвертирования штейнов или не совсем удобны для практического использования. В связи с этим и опираясь на существующие методы расчета фурм предложена новая методика расчета, учитывающая условия и ограничения действующего производства.

В качестве главного критерия расчета фурм типа "труба в трубе" принята одинаковая скорость истечения воздушного потока по основной внутренней трубе и защитной смеси по межтрубному зазору. Такой подход позволяет предполо-

жить, что на первоначальном этапе воздушный поток и защитная смесь не будут смешиваться друг с другом, обеспечивая ограниченный доступ кислорода дутья к окисляемым компонентам расплава, а это, в свою очередь, должно ограничить резкий рост температур в фурменной зоне, создавая условия для увеличения кампании конвертора.

Предлагаемая методика состоит из последовательного решения восьми уравнений по определению основных технологических показателей фурмы.

**Первое уравнение** выведено из преобразованного уравнения Бернули–Сен Вена для определения теоретической пропускной способности воздушной фурмы в зависимости от давления дутья и температуры воздуха, ( $V_0$ ):

$$V_0 = 0,728 \cdot P_\phi \sqrt{\frac{1}{T} \left[ \left( \frac{H}{P_\phi} \right)^{1,425} - \left( \frac{H}{P_\phi} \right)^{1,715} \right]}, \text{ м}^3/\text{мин} \quad (1)$$

где,  $F_{\text{отв}}$  – площадь воздушного отверстия фурмы,  $\text{м}^2$ ;  $T$  – абсолютная температура воздуха,  $^\circ\text{К}$ ;  $H$  – абсолютная величина гидростатического давления слоя расплава,  $\text{КПа}$ ;  $H = (\gamma h \cdot C_1 \cdot 30)$ ,  $\text{КПа}$ , где  $\gamma$  – плотность расплава,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ,  $h$  – высота слоя расплава,  $\text{м}$ ;  $P_\phi$  – абсолютное давление воздуха в коллекторе,  $\text{КПа}$ ;  $C_1$  – коэффициент, учитывающий чистоту фурм.

**Второе уравнение** вытекает из преобразования уравнений Сен Венана-Венцеля, неразрывности потока и расчета средней плотности воздуха, что позволяет найти давление воздуха на срезе фурмы, ( $P_m$ ):

$$P_m = \sqrt{P_\phi^2 - 3,7 \cdot \frac{L \cdot \rho \cdot V^2 T}{d_r^5}}, \text{ КПа} \quad (2)$$

где:  $\lambda$  - коэффициент трения, являющийся функцией критерия Рейнольдса и для стальной трубы равен 0,04;  $L$  – длина фурменной трубы,  $\text{м}$ ;  $d_r$  – гидравлический диаметр фурмы,  $\text{м}$ ;  $\rho$  – плотность воздуха,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $T$  – температура воздуха в канале фурмы,  $\text{К}$ ;  $F$  – площадь сечения фурмы,  $\text{м}^2$ .

**Третье уравнение:** Для определения скорости истечения воздуха ( $\omega$ ) из канала фурмы используем уравнение Сен Венана-Венцеля с выведенной нами зависимостью ( $P_m$ ):

$$\omega = C_1 \sqrt{7RT \left( 1 - \left( \frac{H}{P_m} \right)^{0,2875} \right)}, \text{ м}/\text{с} \quad (3)$$

где:  $R$  – газовая постоянная, для воздуха равна 287,14 Дж/(кг\*К).

**Четвертое уравнение:** При рассчитанной скорости истечения воздушной среды, найдем давление торможения на срезе фурмы для защитной среды по формуле (4) для условия равенства скоростей истечения воздуха и газа.

$$P_m^{азот} = \frac{H}{\left[ 1 - \frac{(k^{азот} - 1)\omega^2}{2k^{азот} R^{азот} T^{азот}} \right]^{\frac{k^{азот}}{k^{азот} - 1}}}, \text{ КПа} \quad (4)$$

где:  $K^{азот}$  константа адиабаты, для азота - 1,4;  $R^{азот}$  – газовая постоянная, для азота 296,9 Дж/(кг\*К).

**Пятое уравнение** позволяет рассчитать необходимую площадь сечения щели для заданного зазора. Практика использования ФЗО в черной и цветной металлургии показала, что, как правило, ширина щели между трубами составляет 1-3 мм. Это связано как с параметрами возможного расхода и давления защитного газа, так и со сложностью и особенностями изготовления, монтажа и обслуживания фурм.

$$F_{щели} = \frac{\pi}{4} (d_{внеш}^2 - d_{вн}^2), \text{ м}^2 \quad (5)$$

где:  $d_{внеш}$  – внутренний диаметр внешней трубы, м;  $d_{вн}$  – внешний диаметр внутренней трубы, м.

**Шестое уравнение:** Плотность азота на срезе фурмы, ( $\rho^{азот}$ ):

$$\rho^{азот} = \frac{P_m^{азот}}{R^{азот} T^{азот}} 10^3 \left( \frac{H}{P_m^{азот}} \right)^{\frac{1}{k}}, \text{ кг/м}^3 \quad (6)$$

**Седьмое уравнение:** Преобразовывая выше указанные формулы, относительно расхода газа на срезе фурмы получим зависимость (7) позволяющую рассчитать расход защитной смеси, ( $V_{азот}$ ):

$$V_{азот} = \frac{\omega \rho^{азот} F_{щели}}{\rho_0}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (7)$$

**Восьмое уравнение:** На основании формулы (2), рассчитаем необходимое абсолютное давление азота перед фурмоколлектором, ( $P_{азот}$ ):

$$P_{азот} = \sqrt{P_m^{азот2} + 3,7 \frac{I}{d_{щели}} \frac{\gamma_0 V_{азот}^2 T_{азот}}{F_{щели}^2}}, \text{ КПа} \quad (8)$$

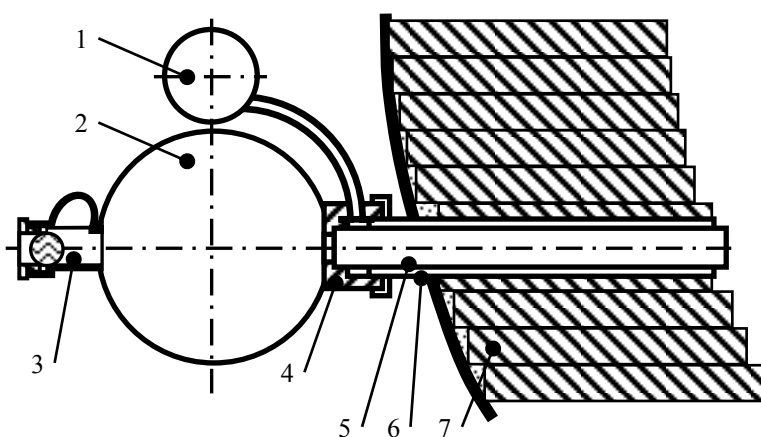
Для условий 30-ти тонного конвертора по переработке никелевых штейнов, где в качестве защитной среды принят азот выполнен расчет технологических показателей.

Исходные данные для расчета: длина фурмы  $L=0,5$  м; ее диаметр  $d=0,04$  м; температура воздуха  $T=333$  °К; абсолютное давление воздуха в фурмоколлекторе  $P_\phi=212,7$  КПа; удельный вес расплава над фурмами  $\gamma=5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>; высота расплава над фурмами  $h=0,6$  м.

В результате расчета получим: расход воздуха на фурму  $V_0$  равно 27,3 м<sup>3</sup>/мин; абсолютное давление воздуха на срезе фурмы  $P_m=186,6$  КПа; скорость истечения воздуха в расплав  $\omega=253$  м/с; необходимое давление азота на срезе фурмы  $P_m^{азот}=277,7$  КПа; площадь щели  $F_{щели}=0,000314$  м<sup>2</sup>; плотность азота на срезе фурмы  $\rho^{азот}=1,75$  кг/м<sup>3</sup>; объем защитной смеси  $V_{азот}=6,7$  м<sup>3</sup>/мин; абсолютное давление азота перед фурмоколлектором  $P_{азот}$  равно 409,7 КПа.

С целью удобства практического использования представленной методики для расчетов в работе представлена ее математическая модель с использованием табличного редактора Excel.

В третьей главе показан пример расчета конструкции фурменного прибора и показано устройство установки подачи защитной среды на основании полученных технологических показателей для ФЗО (рисунок 1).



ФЗО представляет из себя "трубу (5) в трубе (6)" закрепленные в распределительном устройстве фурмоколлектора (4) путем их ввинчивания с зазором между стенками труб от 1 до 2мм.

Рисунок 1 - Конструкция ФЗО: 1 – коллектор защитного газа; 2 – коллектор воздушного дутья; 3 – воздушный клапан; 4 – распределительное устройство; 5- внутренняя фурма; 6- наружная фурма; 7 – футеровка фурменного пояса.

Защитный газ подается в распределительное устройство каждой фурмы из соответствующего коллектора (1). Воздушное дутье поступает из воздушного коллектора (2). Контроль (фурмовка, прочистка) за состоянием воздушных фурм осуществляется через воздушный клапан (3).

**В четвертой главе** представлены результаты практического внедрения на конверторах действующего предприятия. В ходе промышленных испытаний были изучены вопросы влияния ФЗО на кампанию конверторов и на их производительность. Рассмотрены вопросы воздействия различных защитных сред на качественные показатели конвертирования.

На конверторах набора и варки файнштейна в защитной оболочке использовали азот. На конверторах обеднения конверторного шлака применяли, в основном, азот, в последующем провели испытания с природным газом, показавшим эффект не только в стойкости футеровки, но и в обеднении шлака по никелю и кобальту.

#### **Влияние ФЗО на кампанию конвертора**

В процессе испытаний снимались все показатели, связанные с процессом конвертирования как на конверторах с ФЗО, так и без защитной оболочки.

Опыт эксплуатации конверторов с ФЗО (таблица 1) показал, что кампания конверторов набора, увеличилась с 5-8 суток до 16-34 суток.

Таблица 1 - Технологические показатели конверторов с ФЗО

Показатели	До модернизации	Расчет, С <sub>1</sub> -1,0	Факт, С <sub>1</sub> -0,8
Внутренний диаметр воздушной фурмы, мм	40	40	40
Наружный диаметр воздушной фурмы, мм	48	48	48
Внутренний диаметр азотной фурмы, мм		52	52
Наружный диаметр азотной фурмы, мм		60	60
Ширина щели, мм		2	2
Расход воздуха на фурму, м <sup>3</sup> /ч	900-1300*	1639	1100-1400*
Расход азота на фурму, м <sup>3</sup> /ч		400	300-360*

\* - фактические колебания расходов связаны с изменением уровня расплава над фурмами и его плотности в ходе процесса конвертирования

Кампания конверторов набора и варки автоклавной массы увеличилась с 13-15 суток до 22-39 суток. Работа конверторов обеднения с азотом возросла в 1,4-1,5 раза до 70-90 суток. При использовании в качестве защитной среды природного газа их кампания возросла до 105 суток.

### **Влияние ФЗО на производительность конвертора**

Производительность конверторов, работающих с ФЗО и без нее была оценена по операциям набора. Исследовалась работа по переработке штейна, холодных присадок и отходов в одинаковые периоды сравнения. В целом за период в течении полутора лет конвертора с ФЗО показали рост увеличения переработки штейна на 4,4% и переработку отходов увеличили на 18,3%. Переработка холодных присадок на конверторах с ФЗО снизилась на 6,9%.

### **Влияние защитной среды на процессы обеднения**

Продувка воздухом штейна, содержащего медь, никель, кобальт и железо как в сульфидной форме, так и в металлическом виде, преследует цель максимально возможного и целесообразного удаления железа в шлак, а серы в газовую фазу. Ошлакованию железа сопутствует переход цветных металлов в шлак снижая их прямое извлечение в готовую продукцию. В связи с этим, процессам конвертирования всегда сопутствуют технологические мероприятия или способствующие снижению потерь металлов со шлаками или связанные с последующей переработкой шлака с целью частичного извлечения этих металлов и возвращения их в цикл переработки. В основе обеднения конверторных шлаков способом перемешивания жидких фаз лежат обратимые реакции (14-15). В соответствии с законом действующих масс в условиях равновесия эти реакции можно представить через константу термодинамическую равновесия  $K_{Me/Fe}$  (16).



$$K_{Me/Fe} = \frac{N_{(Me)} * \gamma_{(Me)} * N_{[Fe]} * \gamma_{[Fe]}}{N_{(Fe)} * \gamma_{(Fe)} * N_{[Me]} * \gamma_{[Me]}} \quad (16)$$

где:  $N_{(Me)}$  – мольная доля никеля, кобальта или меди в шлаке,  $N_{(Fe)}$  – мольная доля железа в шлаке,  $N_{[Me]}$  – мольная доля никеля, кобальта или меди в массе,  $N_{[Fe]}$  – мольная доля железа в

массе;  $\gamma_{(Me)}$  – коэффициент активности металлов в шлаке,  $\gamma_{[Me]}$  – коэффициент активности металлов в массе,  $\gamma_{(Fe)}$  – коэффициент активности железа в шлаке,  $\gamma_{[Fe]}$  – коэффициент активности железа в массе.

Для расчета термодинамических показателей этих реакций были использованы уравнения Киргофа, М.И. Темкина и Л.А. Шварцмана.

Результат расчета по основным обменным реакциям процесса обеднения методом перемешивания фаз для стандартных условий и температуре процесса обеднения в 1300 К показан в таблице 2. На основании расчетов можно сделать вывод, что наибольшее изменение констант равновесия в зависимости от температуры наблюдается для реакций сульфидирования никеля и кобальта.

Таблица 2 - Термодинамические расчеты основных реакций обеднения

№ р-ции	Формула	$\Delta G_{298}^0$	$\Delta G_{1300}^0$	$K_{Me/Fe}$	$K_{Me/Fe}$
		$\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$	Т 298К	Т 1300К
17	$NiO + Fe \leftrightarrow FeO + Ni$	-31,70	-59,13	$0,3 \cdot 10^{-5}$	0,00421
18	$CoO + Fe \leftrightarrow FeO + Co$	-28,09	-35,97	$1,2 \cdot 10^{-5}$	0,03588
19	$NiO + FeS \leftrightarrow FeO + NiS$	-21,56	-22,86	$16,7 \cdot 10^{-5}$	0,12063
20	$CoO + FeS \leftrightarrow FeO + CoS$	-46,88	-35,00	$0,01 \cdot 10^{-6}$	0,03924

Неблагоприятное влияние на распределение металлов оказывает магнетит в шлаке. Увеличение содержания магнетита приводит к росту вязкости шлака и, соответственно, к увеличению механических потерь мелких частиц сульфидного расплава, росту потерь растворимых окислов цветных металлов в шлаке. Разрушению магнетита в шлаке способствует повышенное содержание оксида кремния в нем и металлизация штейна по реакции (21).



Переход цветных металлов из шлака в штейн состоит из трех стадий: передвижение ионов никеля, кобальта и меди к границе раздела шлака и штейна; преодоление этой границы; распространение металлов в штейне. Первая стадия является наиболее медленной, определяющей скорость процесса, соответственно, увеличение относительной поверхности соприкосновения фаз ускоряет переход металлов в штейн.

На основании изложенного можно утверждать, что для максимального извлечения цветных металлов из конверторных шлаков в штейн необходимо высокое содержание металлического железа в извлекающем штейне, пониженное содержание в шлаке магнетита, достаточно высокая температура, хорошее перемешивание фаз и создание условий для осаждения металлов из шлака в штейн.

Типовой состав конверторного шлака с конверторов набора в процессе переработки штейна, представлен на рисунке 2.

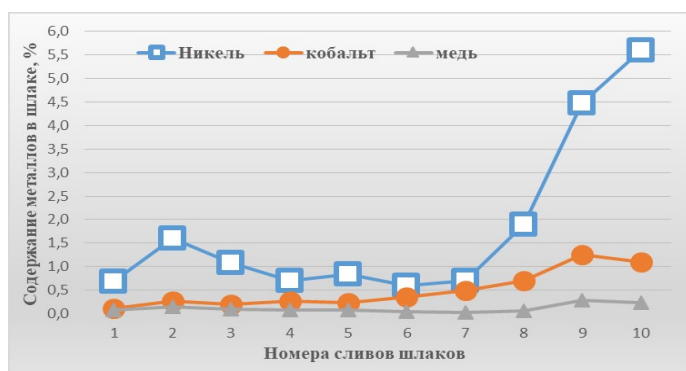


Рисунок 2 - Изменение содержания цветных металлов в шлаке по мере продувки штейна.

Сравнивая показатели обеднения с применением в качестве защитной среды азота или природного газа, отмечено, что содержание никеля и кобальта в шлаке зависят от состава защитной среды. Наибольшее влияние на переход металла из шлака в массу при продувке природным газом наблюдалось по кобальту. Для конвертора, работающего с азотом, обедняемый шлак становился оборотным после пятого обрабатываемого ковша, при этом содержание кобальта в массе составляло 1,3%, а содержание в шлаке - 0,05%. Для ФЗО с  $\text{CH}_4$  только после обработки восьмого ковша шлак становился оборотным, при этом содержание кобальта в массе превышало 2,4% (рисунок 3). Для никеля эффект природного газа несколько ослаблен, шлак становился оборотным после седьмого ковша.

Для поведения меди в шлаках в ходе данных испытаний какой-либо зависимости от состава защитного газа выявлено не было.

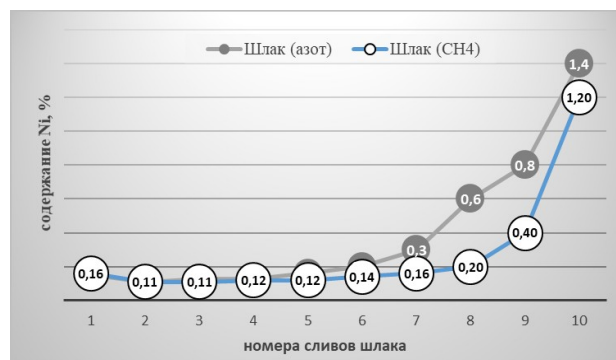
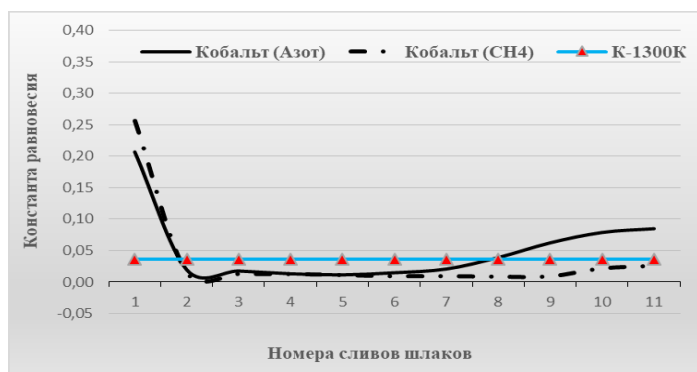
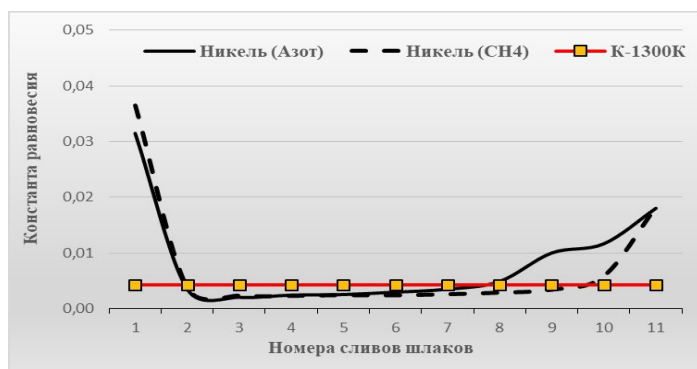


Рисунок 3 - Кобальт и никель в шлаке после обеднения с азотом и  $\text{CH}_4$



Анализ результатов экспериментов позволяет утверждать, что влияние природного газа на обеднение конверторных шлаков основано на реакциях разложения  $\text{CH}_4$  и окисления продуктов разложения с восстановлением оксидов железа, никеля и кобальта шлака.

В ходе исследований было отмечено, что содержание железа в шлаке при перемешивании фаз, практически не изменялось, что позволяет предположить об уменьшении константы равновесия для кобальта по реакции (21) в связи с уменьшением его содержания в шлаке при контакте с более богатыми массами. Отмеченное изменение константы по мере обработки новых порций шлака для кобальта и никеля представлено на рисунке 4. Сравнивая термодинамическую и условную константы равновесия для содержаний кобальта менее 1% и при температуре 1300 К, можно предположить, что снижение условной константы при использовании природного газа возможно не только под влиянием металлического железа (или серы) в массе, но и снижением парциального давления кислорода при разложении газа. Данный эффект особенно заметен тогда, когда влияние железа металлического уменьшается после 7-8 обработанного ковша.



Для никеля константа равновесия при применении природного газа уменьшается незначительно.

Наибольшее различие наблюдается на завершающих стадиях технологической операции, при обработке последних ковшей шлака.

Рисунок 4 - Константа равновесия реакции для кобальта и никеля с ФЗО для азота и  $\text{CH}_4$  и термодинамическая константа реакции для Т-1300 К.

## Механизм защитного действия ФЗО с природным газом

При подаче в расплав кислородсодержащего дутья, окруженного слоем природного газа, факел проникает вглубь ванны на расстояние в зависимости от давления дутья на срезе фурмы, скорости истечения, плотности расплава, его температуры и глубины погружения фурм в расплав. Для оценки глубины проникновения дутьевого факела в расплав используем методику Казанцева И.Г.

Результаты расчета для различного уровня заполнения шлаком конвертора представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Расчет глубины проникновения дутья в расплав для  $\text{CH}_4$

Уровень расплава, см	Скорость смеси на срезе фурмы, м/с	Плотность газовой среды, кг/м <sup>3</sup>	Удельный плотность расплава, кг/м <sup>3</sup>	Внутренний диаметр фурмы, м	Ar	X/d	Глубина проникновения в расплав, см
100	205	1,12	5000	0,04	36,1	4	16
130	169	1,20	5000	0,04	26,4	2	8

Учитывая равенство скоростей воздуха и природного газа, на расстоянии 2-4 x диаметров от среза фурмы, кислород дутья не вступает в химическое взаимодействие с металлами расплава и, в-первую очередь, с железом металлическим и его сульфидом. Кроме того, природный газ под действие высокой температуры расплава разлагается с поглощением тепла. При разложении природного газа, температура на срезе фурмы, не превышает 500<sup>0</sup>С. Это обстоятельство обеспечивает защиту фурмы от воздействия высокой температуры расплава, предотвращает выгорание фурменной трубки и образования "нор" в огнеупорной футеровке. Удаляясь от среза фурмы, защитная оболочка из природного газа разрушается и кислород воздуха активно взаимодействует с массой расплава и природным газом. При этом часть кислорода расходуется на окисление продуктов разложения природного газа, снижая концентрацию свободного кислорода. В этих условиях скорость окисления металлов снижается и реакции обмена между металлами, сульфидами и оксидами шлака получают дополнительное преимущество из-за снижения парциального давления кислорода.

## Механизм защитного действия ФЗО с азотом

Механизм влияния ФЗО на защиту огнеупорной футеровки конвертора аналогичен, как и для природного газа. Суть его заключается в проникновении струи воздуха в расплав (область 1, рисунок 5) на глубину (дальность), определяемую давлением дутья, уровнем расплава и его удельной массой. Чем выше уровень расплава (переполнение конвертора), выше плотность расплава по мере его продувки воздухом и удаления железа, тем меньшее проникновение воздуха в ванну, тем больше дутьевой факел прижимается к фурменному поясу, создавая высоко-температурную зону в этом районе и высокую циркуляцию расплава в противотоке с движением воздуха. Поток расплава в области 3 направлен вниз вдоль стенки и разрушает футеровку конвертора дополнительным механическим воздействием, проникновением перегретого и жидкотекучего расплава в фурменную зону кирпича через трещины и сколы в футеровке. Именно этот поток не позволяет сформировать на поверхности кирпича защитный гарнисаж при агрессивности расплава в отношении железа магнетита.

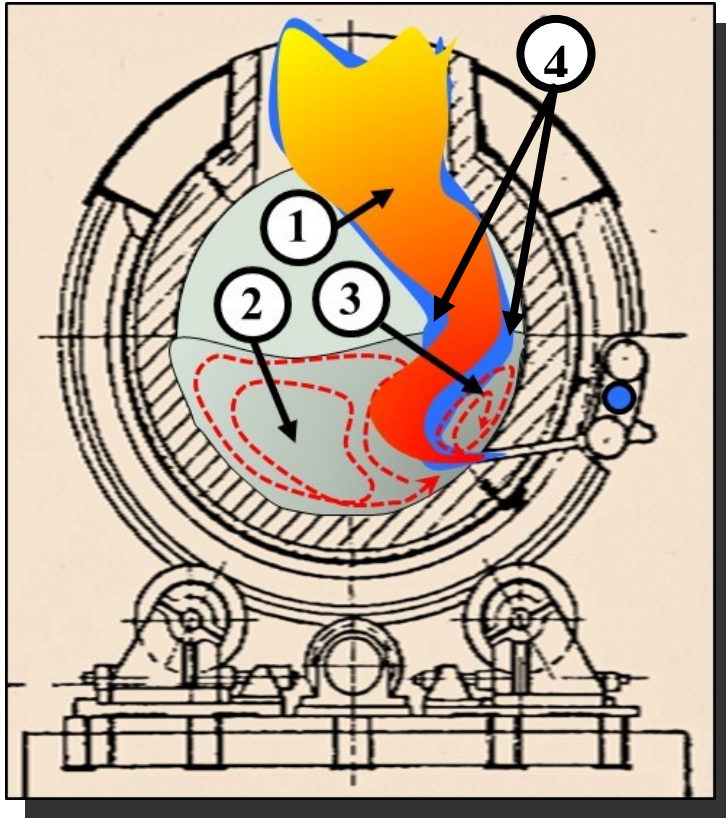


Рисунок 5 - Механизм воздействия дутья на расплав

Вторая значимая область циркуляции расплава (область 2) движется вдоль дна конвертора сверху вниз и омывает фурменную зону восходящим потоком снизу.

Таким образом, в районе фурмы встречаются два противоположенных потока расплава и дутьевой факел, создающий температуру в этой зоне на уровне 1500-1600°K.

Механическое, тепловое и химическое воздействие агрессивного расплава существенно ограничивают срок службы огнеупора, не имеющего защитного гарнисажа.

В соответствии с методикой Казанцева И.Г. глубина проникновения струи с азотом достигает 6 диаметров фурмы. В результате возникают несколько эффектов: смещение дутьевого факела вглубь ванны от фурменной стенки, увеличение объема области 3, снижение скорости циркуляции расплава вдоль стенки, успокоение ванны и удаление высокотемпературного фокуса от поверхности огнеупора, снижая тепловое воздействие на него.

Наблюдения за механизмом воздействия азота на ход конвертора, позволили предположить, что даже за пределами защитного влияния на факел дутья (область 4), азот, практически не смешивается с воздухом и расширяясь по объему в 3-4 раза удаляется из конвертора с газами, унося тепло из реакционной зоны. Это предположение подтверждается тем, что при подаче азота в смеси с дутьем – производительность конвертора снижается из-за уменьшения парциального давления кислорода, в случае с ФЗО – производительность конвертора не изменяется и даже немного растет, хотя в пересчете на содержание кислорода в общем количестве воздуха и азота, его содержание снижается до 17-19%. К аналогичным выводам об условной не смешиваемости газа защитной оболочки с дутьевым воздухом пришли и зарубежные исследователи.

Для условий 30-ти тонного конвертора эффект ФЗО возникает при обеспечении скорости истечения воздуха и азота на уровне 220-250 м/с. Для этого целесообразно применять наружную фурменную трубу с наружным диаметром 60 мм и толщиной стенки 4 мм, внутреннюю трубу с наружным диаметром 48 мм и толщиной стенки 4 мм.

Данная конструкция фурмы потребует применение давления в воздушном фурмоколлекторе не ниже 0,1 МПа и давление азота в азотном коллекторе – 0,3 МПа. Расход воздуха на одну фурму при этом составит 27,3 м<sup>3</sup>/мин, азота – 6,7 м<sup>3</sup>/мин. При использовании природного газа в качестве защитной среды его расход составит 3,2 м<sup>3</sup>/мин и давления 0,13 МПа.

## **Результат использования методики и новой конструкции ФЗО**

Разработка методики расчета фурменных приборов типа "труба в трубе" с подачей в качестве защитной среды азота, природного газа или паровоздушной смеси с учетом достоинств и недостатков уже имеющихся методов расчета применительно к конвертированию никелевых штейнов, позволила теоретически обосновать конструкцию фурмы с защитной оболочкой, изготовить конструкцию и провести промышленные испытания в действующем производстве. По результатам испытаний был получен положительный эффект в увеличении кампании конверторов, что позволило внедрить эту конструкцию на всех конверторах плавильного цеха комбината "Южуралникель".

Оценка экономической эффективности данного внедрения привело к экономии огнеупорного кирпича в объеме 1560 тонн в год и дало экономический эффект в ценах в ценах 2017г в сумме 88,608 млн. руб.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Теоретическое обоснование и разработка новой конструкции фурменного прибора для конвертора - фурмы в защитной оболочке, обеспечило эффективную защиту огнеупорного кирпича от воздействия высоких температур и агрессивного расплава черных и цветных металлов в конверторе по переработке никелевых штейнов.

При выполнении исследовательских задач была предложена новая методика расчета фурм типа "труба в трубе" с защитными оболочками из азота и природного газа. Разработанная методика позволила рассчитать технологические параметры новой конструкции и выполнить ее для действующего оборудования. Испытания фурмы с защитной оболочкой и последующее ее внедрение на всех конверторах действующего предприятия привело к увеличению кампании конверторов: набора и варки фанштейна с 5-8 суток до 16-34 суток (более чем в 3-4 раза), подготовки и варки автоклавной массы с 13-15 до 22-39 суток (более чем в 2 раза), обеднения конверторного шлака с 50 до 70 суток (более чем 1,4 раза). При ис-

пользовании в качестве защитной среды природного газа кампания конвертора обеднения увеличилась до 105 суток (более чем 2 раза).

Основная научная идея заключалась в смещении высокотемпературного фокуса дутья от огнеупорной футеровки вглубь ванны конвертора. Для этого было предложено ограничить контакт кислорода дутья с расплавом в начальной стадии проникновения струи в ванну за счет использования защитного газа вокруг воздушной струи.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Выполнен анализ решений и способов защиты дутья в процессах конвертирования в черной и цветной металлургии, и выделены положительные моменты, которые были использованы применительно к конверторам для переработки никелевого штейна;
2. Выполнен анализ существующих методик по расчету устройств для процессов конвертирования и разработана новая методика расчета фурм в защитной оболочке применительно к условиям действующих производств при переработке никелевых штейнов. Отличительной особенностью разработанной методики является то, что в основу формирования защитной оболочки положено равенство скоростей защитного газа и воздушного дутья на срезе фурмы;
3. Составлена математическая модель расчета ФЗО для никелевого конвертора на базе табличного редактора Excel;
4. Разработана конструкция фурменного прибора для конвертора с учетом технологических параметров, полученных на основании новой методики расчета;
5. Проведена адаптация новой конструкции фурмы в условиях действующего производства с учетом имеющихся ограничений технологического и организационного характера;
6. Проведены промышленные испытания и последующее внедрение ФЗО на всех конверторах действующего производства, определено влияние защитной оболочки на кампанию конверторов, их производительность и эффективность процессов обеднения;

7. По результатам внедрения выполнен расчет годового экономического эффекта от увеличения кампании работы оборудования, составившего 88,608 млн. руб. в ценах 2017 г.

Научная новизна диссертационной работы была обеспечена: разработанной методикой расчета фурм в защитной оболочке из различных газов применительно для процессов конвертирования цветных металлов; разработкой новой конструкцией фурменного прибора, не имеющей аналогов в мировой практике; в результате промышленных испытаний фурмы в защитной оболочке из природного газа получены новые зависимости распределения цветных металлов между жидкими фазами шлака и штейна; выполнением расчетов констант равновесия распределения металлов в расплавах при использовании в качестве защитной среды природного газа; новым механизмом, объясняющим воздействие защитной среды на ход процессов конвертирования и поясняющим рост стойкости огнеупоров фурменного пояса и изменения условных констант равновесия никеля, меди и кобальта между штейном, сульфидной массой и конверторными шлаками.

Результаты практического применения разработанной конструкции фурменного прибора на действующем производстве подтвердили все теоретические предположения и показали преимущество ФЗО при сопоставлении с ранее достигнутыми показателями на предприятиях России.

Предложенная методика расчета фурм в защитной оболочке может быть применима при конвертировании различных сплавов цветных и черных металлов. Расчеты с ее использованием позволяют выработать рекомендации для конверторов, перерабатывающих медные, медно-никелевые и никелевые штейны с целью увеличения их кампаний.

Для повышения эффективности обеднения конверторных шлаков методом перемешивания фаз предложено использование фурм в защитной оболочке, где в качестве защитного газа применяется природный газ.

**Дальнейшие исследования в теории и практике использования фурм в защитной оболочке могут быть направлены на повышение производительности оборудования и автоматизацию производственных процессов.**

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:

1. Король Ю.А. Переработка никелевых штейнов в горизонтальных конверторах с фурмами в защитной оболочке / Н.М. Барсуков, **Ю.А. Король**, М.Р. Русаков, А.А. Гальнбек, А.А. Пашковский, А.Ф. Пронин // Цветные металлы. 1992. № 3. - С. 12-13 (0,25 п.л./ 0,20 п.л.)
2. Король Ю.А. Расчет фурмы в защитной оболочке для конвертирования никелевых и медных штейнов, рекомендации по ее применению / **Ю.А. Король**, С.С. Набойченко // Цветные металлы. 2018. № 5. - С. 31-40 (1,25 п.л./1,2 п.л.)
3. Король Ю.А. Практика применения фурм в защитной оболочке при конвертировании / **Ю.А. Король**, С.С. Набойченко, С.В. Гуляев // Цветные металлы. 2018. № 6. - С. 14-20 (0,9 п.л./ 0,8 п.л.)
4. Король Ю.А. Использование природного газа в фурмах с защитной оболочкой / **Ю.А. Король**, С.С. Набойченко, С.В. Гуляев // Цветные металлы. 2018. № 7. - С. 46-50 (1,0 п.л. /0,9 п.л.)
5. Король Ю.А. Совершенствование способа обеднения методом перемешивания фаз / **Ю.А. Король**, С.С. Набойченко // Цветные металлы. 2018. № 8. - С. 37-44 (0,9 п.л. / 0,8 п.л.)

### Другие публикации

6. Гальнбек А.А., Барсуков Н.М., Русаков М.Р., Чумаков Ю.А., **Король Ю.А.** Системы охлаждения теплонапряженных узлов печей и возможности использования вторичных энергоресурсов (ВЭР) теплоносителя // Разработка и внедрение ресурсосберегающих технологических процессов в никель-кобальтовом производстве: сборник научных трудов. – Л.: Гипроникель. 1988. - С. 115-120 (0,4 п.л. /0,1 п.л.)