

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования "Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина"

На правах рукописи

Король Юрий Александрович

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

Специальность: 05.16.02 -Металлургия черных, цветных и редких металлов

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата наук

Научный руководитель
Член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор
Набойченко Станислав Степанович

Екатеринбург – 2018г

	Стр.
ОГЛАВЛЕНИЕ	
ВВЕДЕНИЕ	4
1. ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ КОНВЕРТИРОВА- НИЯ НИКЕЛЕВЫХ ШТЕЙНОВ	14
1.1. Теоретические основы процесса конвертирования	16
1.2. Состав никелевого штейна	19
1.3. Состав продуктов переработки	20
1.3.1. Файнштейн	20
1.3.2. Конверторные шлаки	21
1.4. Особенности конвертирования никелевых штейнов	23
1.4.1. Получение файнштейна	23
1.4.2. Практика обеднения конверторных шлаков	25
1.4.3. Получение автоклавной массы	27
1.4.4. Технические показатели конверторов	27
1.4.5. Причины низкой кампании конверторов	30
1.4.5.1. Термическое воздействие	32
1.4.5.2. Химическое воздействие	33
1.4.5.3. Механическое воздействие	34
1.5. Пути повышения эффективности работы конвертора	35
Выводы	45
2. ГЛАВА 2. МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ФЗО	46
2.1. Существующие подходы к расчету ФЗО	46
2.2. Метод расчета фурмы типа "труба в трубе".....	53
2.3. Практическое применение предложенной методики	58
2.4. Математическая модель ФЗО в табличном редакторе Excel.....	61
Выводы	64
3. ГЛАВА 3. КОНСТРУКЦИЯ ФЗО	66
3.1. Требования к конструкции.....	66
3.2. Фурма в защитной оболочке	67
3.3. Особенности конструкции	68

	Выводы	70
4.	ГЛАВА 4. ВНЕДРЕНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ КОНСТРУКЦИИ ФУРМЫ В ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКЕ.....	71
4.1.	Влияние ФЗО на кампанию конверторов	71
4.2.	Влияние ФЗО на производительность конвертора.....	76
4.3.	Влияние защитной среды на процессы обеднения конверторных шлаков.....	80
4.4.	Механизм защитного действия ФЗО	95
4.4.1.	ФЗО с природным газом	95
4.4.2.	ФЗО с азотом	97
4.5.	Результат использования методики и новой конструкции ФЗО ...	100
4.6.	Выводы	102
	Заключение.....	105
	Список литературы	108

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертационного исследования и степень ее разработанности

Никель и кобальт на протяжении десятилетий остаются металлами, являющимися неотъемлемой частью научно-технического прогресса. Развитие космонавтики, самолетостроения, приборостроения, химии и нефтехимии, автомобилестроения и строительства, оборонных отраслей и медицины невозможно без использования этих металлов. Ежегодно возрастающий мировой спрос на никель и кобальт стимулируют горнодобывающую и металлургические компании развивать и совершенствовать способы и методы добычи и переработки этих металлов, при этом уровень затрат на производство становится определяющим в выборе разрабатываемых типов руд и используемых технологических решений (таблицы 1, 2). Особенно это стало важным на фоне снижения в последние годы цен на никель и кобальт, ужесточения требований к защите окружающей среды (рисунок 1). Поэтому, несмотря на многочисленные прогнозы аналитиков о росте цен на никель и кобальт в ближайшей перспективе, поиск путей снижения себестоимости производства является актуальным для всех участников процесса добычи и переработки никельсодержащих руд [3, 4].

Таблица 1

Баланс мирового рынка никеля в 2006-2015 годах, млн. т.¹

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Производство	1,44	1,60	1,76	1,96	1,99	1,98	2,09	2,10
Потребление	1,47	1,61	1,67	1,78	1,87	1,89	2,12	2,20

Никельсодержащие руды, в основном, двух типов: окисленные и сульфидные. Переработка сульфидных руд технологически и экономически более предпочтительна в связи: с высокими содержаниями металлов (меди, никеля и кобальта);

¹ Данные International Nickel Study Group [1], USGS science for a changing world [2]

с меньшими затратами энергоресурсов; высокой долей попутных драгоценных металлов в руде, существенно увеличивающих ее товарную ценность. В тоже время, содержащаяся в руде сера требует дополнительных затрат на ее улавливание и утилизацию. На фоне роста цен на никель и кобальт жесткие требования по экологии и ограниченность рынков сбыта серосодержащих продуктов делают привлекательным вовлечение в переработку месторождений окисленных никелевых руд.

Таблица 2

Мировой рынок Co в 2006-2015 годах, тыс. т. [5]

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Производство	84,0	83,3	77,2	85,9	91,8	98,1	93,9	116,9

Независимо от способа подготовки и пирометаллургической переработки окисленной никелевой руды, после ее плавки образуется промежуточный продукт – никелевый штейн (роштейн), который далее, как правило, конвертируется для получения фاینштейна.



Рис.1. а) динамика цен на никель на ЛМЕ за период 2011-2018 гг [6], \$/т
 б) динамика цен на кобальт на ЛМЕ за период 2011-2018 гг [7], \$/т

В основе операций конвертирования лежит удаление из расплава железа путем окисления его кислородом воздуха и ошлакованием с помощью кварца, вводимого в процесс плавки в качестве флюса. Содержание железа в штейне уменьшается с 55-60 % до 3,5 – 4 % при работе с максимально возможным сохранением в расплаве кобальта и последующей гидрометаллургической переработкой с целью получения никеля, его солей и кобальта в виде металла, или до 0,16-0,26 % при

последующей переработке файнштейна с целью получения никеля огневого и медного купороса.

Минералогические исследования штейнов, полученных при плавке окисленных никелевых руд, показывают, что они состоят, в основном, из твердых растворов металлического сплава железа, никеля, кобальта и сернистого железа типа пирротина; из химических соединений типа пентландита; сплавов сульфидов на основе сульфида никеля [8]. Особенностью этих штейнов является то, что доля металлического железа в них составляет 30-60% от его общего содержания [9]. При переработке такого материала продувкой воздухом, в конверторе выделяется значительное количество тепла, приводящее к интенсивному разрушению огнеупорной футеровки конвертора. Использование холодных присадок для снижения температуры расплава дает временный эффект, т.к. в качестве холодного используются выломки ковшей и конверторов, содержащие большое количество металлизированной фазы.

Кроме этого, на ряде предприятий по переработке никелевых штейнов в конверторах попутно перерабатываются металлические отходы, содержащие от 8 до 20 % никеля, от 1 до 5 % кобальта, до 15 % хрома, остальное железо. Для расплавления и окисления таких материалов требуются температуры, превышающие 1500⁰С, что ограничивает переработку холодных присадок.

Невысокое содержание никеля в исходных продуктах, приводит к организации работы с переливами масс и периодическим простоям оборудования. Температура футеровки конвертора в этом случае может снижаться с 1300 до 600⁰С.

Еще одно обстоятельство, влияющее на процессы конвертирования, является работа на шлаки с содержанием SiO₂ 24-28%. Это вызвано необходимостью максимально возможного снижения содержания никеля и кобальта в конверторном шлаке за счет уменьшения растворимости оксидов металлов в шлаке и улучшения разделения шлака и штейна за счет снижения удельного веса шлака. При таком содержании оксида кремния количество магнетита в шлаке не большое и он не "заматывает" огнеупорную футеровку, тем самым исключая образование защитного

гарнисажа. На стадии варки фэйнштейна содержание железа в расплаве снижается до 0,2%, что, практически, полностью исключает защиту футеровки магнетитом.

Данные особенности никелевых штейнов, металлизированных отходов и процесса конвертирования приводят к тому, что рабочие кампании никелевых конверторов составляют всего 5-12 суток [10-14]. Низкая кампания и необходимость периодического ремонта оборудования с применением дорогостоящих огнеупоров, наряду с соответствующими трудозатратами, высокими расходами на кокс и электроэнергию, приводят к удорожанию конверторного передела и снижению рентабельности производства никеля и кобальта из окисленных никелевых руд с использованием пирометаллургической технологии [15].

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. Работы в области теории и практики конвертирования никелевых, медных и медно-никелевых штейнов рассмотрены в работах Смирнова В.И., Худякова И.Ф., Цейдлера А.А., Захарова Б.Н., Воробьева В.А., Пименова Л.И., Набойченко С.С., Михайлова В.И., Барсукова Н.М., Русакова М.Р., Гальнбека А.А., Бабаджана А.А., Саттаровой А.С., Кудрина А.П., Кашеева И.Д., Стрелова К.К., Ежова Е.И., Недвецкого Е.П., 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., Лебединской Н.А., R.G.H. Lee, Paul E. Queneau, Reinhardt, Guy Savard, Резника И.Д., Рябко А.Г., Хомченкова Б.М., Арефьева К.М., Ежова Е.И., Певзнера М.И. и многих других.

Основные пути по увеличению кампании велись и продолжают по следующим направлениям:

- повышение стойкости огнеупора (к высоким температурам, к агрессивному расплаву, большому количеству теплосмен) [16-19];

- использование новых приемов, технологий, оборудования, приспособлений и организации работ для улучшений качества огнеупорной кладки [19-21];
- охлаждение фурменного пояса кессонированными элементами [22, 25-27];
- регулировка обогащения дутья кислородом, параметров воздушного дутья, содержания никеля и железа металлического в штейне [23, 24, 27, 32];
- использование новых конструкций и устройств для подачи воздуха в расплав [22-25, 61-64];
- организация конвертирования с минимальными межоперационными простоями [28, 29];
- обогрев конвертора в период технологического простоя [28];
- контроль за загрузкой и переработкой никельсодержащих отходов;
- торкретирование огневой поверхности футеровки защитными слоями из различных материалов [30, 31].

Практика действующих предприятий показывает, что наибольший эффект в увеличении длительности кампании конверторов достигнут за счет использования хромитпериклазовых огнеупоров, кладки огнеупора с тепловыми зазорами и засыпки с использованием жидкого стекла, применения закладных кессонов с охлаждением водой под разряжением (ВОПР), организации работ по уменьшению простоя конверторов, обогрева футеровки в период простоя.

Увеличение кампании конверторов на 15-20% было получено при использовании дутья, обедненного по кислороду до 17% [32].

Однако ни одно из перечисленных мероприятий не привело к существенному росту кампании никелевого конвертора, которая остается на уровне не выше 12 суток.

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

Для достижения поставленной цели потребовалось решить **следующие задачи**:

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

Основная научная новизна состоит 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 (азот, природный газ, паровоздушная смесь) 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 цветных и черных металлов.

Объект исследования – технологические процессы конвертирования никелевых штейнов и оборудование для их реализации.

Теоретическая и практическая значимость:

1. Разработана методика и математическая модель расчета фурм в защитной оболочке из различных газов применительно к процессам конвертирования цветных металлов;

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".

В результате выполненных исследований обоснована новая конструкция фурмы в защитной оболочке и даны пояснения по механизму воздействия защитной оболочки из азота, природного газа и паровоздушной смеси для воздушного дутья на процессы конвертирования цветных металлов в части защиты огнеупорной футеровки и механизма 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 распределения цветных металлов между жидкими фазами при пирометаллургической переработке расплавов.

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

Положения выносимые на защиту:

1. Разработка методики и математической модели расчета фурм в защитной оболочке для горизонтальных конверторов по переработке штейнов цветных металлов.
2. Разработка конструкции фурменного прибора, позволяющего реализовать подачу воздушного дутья в защитной оболочке из природного газа в расплав при использовании дутья низких энергетических параметров.
3. Повышение эффективности процессов обеднения конверторных шлаков при использовании в качестве защитной среды природного газа. Расчеты 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 исследуемой фурмы при сопоставлении с ранее достигнутыми показателями на предприятиях России и за рубежом.

Апробация результатов. Основные положения диссертационной работы использованы при разработке новой конструкции фурменного прибора и последующего внедрения фурмы в защитной оболочке на действующем производстве предприятия по переработке окисленных никелевых руд.

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

Публикации. Основные положения диссертации нашли отражение в 6 публикациях в рецензируемых журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией (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 Гипронибель: 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.

ГЛАВА 1

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ КОНВЕРТИРОВАНИЯ НИКЕЛЕВЫХ ШТЕЙНОВ

Цветные металлы были, есть и будут основой совершенствования науки, техники и технологий, развития научно-технического прогресса и являются неотъемлемой частью современной цивилизации. Несмотря на все кризисные ситуации в современном обществе, ежегодно наблюдается рост их производства и потребления (таблицы 1, 2). Учитывая ограниченность легкодоступных и легкоперерабатываемых природных ресурсов, во всем мире наблюдается тенденция вовлечения в разработку новых месторождений со все более низким содержанием цветных металлов, привлечение трудно-перерабатываемых руд и экологически небезопасных материалов.

На этом фоне все кампании и предприятия мира обращают повышенное внимание к месторождениям окисленных никелевых руд ранее законсервированным из-за низкой рентабельности производства. Рост цен на цветные металлы, включая медь, никель и кобальт дает дополнительный стимул к освоению этих объектов, расширяя минерально-сырьевую базу указанных элементов (рисунок 1). При этом все участники медь-никель-кобальтового рынка придают важное значение вопросам снижения затрат на производство при переработке данного типа руд.

Наряду со значимостью вопросов величины энергетических затрат на восстановление окислов металлов с использованием кокса, природного газа, электроэнергии или других доступных ресурсов с последующим плавлением восстановленных металлов, не менее важной является проблема низкой кампании конверторов по переработке получаемых высоко-агрессивных штейнов.

На всех заводах мира, использующих технологию конвертирования никелевого штейна, кампания основного оборудования не превышает 12 суток. Данное обстоятельство связано с особенностями химического состава штейна, получаемого высококремнистого конверторного шлака и требованиями к качеству конечных продуктов конвертирования. Затраты на ремонт конверторов, необходимость

содержания дополнительного количества оборудования и обслуживающего персонала существенно удорожают весь передел и ограничивают переработку окисленных руд по пиromеталлургической технологии с использованием процессов конвертирования.

1.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА КОНВЕРТИРОВАНИЯ

Продувка штейна в конверторе является окислительным процессом для получения фاینштейна и автоклавной массы². В присутствии кварцевого флюса происходит интенсивное окисление металлического и сернистого железа с образованием закиси железа и диоксида серы по реакциям (1-3).



Закись железа соединяется с кремнеземом кварцевого флюса и образует шлак, сливаемый из конвертора после предварительного 2-3 минутного отстоя. Разделению шлака и штейна способствует разница их удельных масс и ограниченная взаимная растворимость сульфидов и окислов металлов. Сернистый газ удаляется из зоны реакции с отходящими газами. По мере ошлакования железа и выгорания серы, масса обогащается никелем и кобальтом.

Процесс конвертирования является периодическим, это связано с необходимостью переработки в нескольких конверторах на стадии набора больших первоначальных объемов штейна с низким содержанием Ni до содержания извлекаемого металла в обогащенной массе 50-60 %, что приводит к сокращению объема полупродукта в 3-4 раза. Для последующей варки фاینштейна богатую массу переливают в один конвертор, где доводят содержание железа в расплаве до 0,6-0,8 %. После выдержки фاینштейна в необогреваемом отстойнике содержание железа в нем снижается до 0,2-0,3 % за счет выпадения из расплава кристаллов ферроникеля

² сульфидный расплав, содержащий никель, медь, железа и серу, отличительной особенностью которого является повышенное содержание кобальта 4-6% и предназначенный для последующей гидрометаллургической переработки в автоклавах

имеющего более высокую температуру плавления чем сульфиды никеля и меди. При получении автоклавной массы содержание железа оставляют на уровне 2-3% и это позволяет максимально эффективно сохранять в расплаве кобальт.

Периодическая работа конверторов набора, сопровождающаяся переливом массы и охлаждением футеровки с 1500 до 600⁰С, приводит к большому количеству теплосмен и тепловым ударам на огнеупоры при последующей зарядке конвертора штейном и началом новой технологической операции.

В результате экзотермических реакций (1-3) в конверторе выделяется тепло, достаточное для ведения процесса без затрат топлива. Более того, количество тепла является избыточным и с целью сохранения футеровки конвертора в него загружают холодные присадки (выломки ковшей, замерзший (холодный) штейн, богатые обороты, пыли прочие материалы) для их расплавления за счет тепла, образующегося в ходе окисления штейна.

Скорость окисления железа штейна, а соответственно, и производительность конвертора зависят главным образом от количества подаваемого в расплав кислорода с воздушным дутьем. Количество дутья, поступающего в конвертор, в свою очередь, зависит от его природы, давления и температуры, физико-химического состояния расплава, конструкции конвертора и его наполнения расплавом.

Время прохождения пузырьков воздуха через слой жидкого штейна не превышает 0,13 с, но даже при этом использование кислорода дутья находится на уровне 80-95% в зависимости от стадии процесса конвертирования [33, 34]. Аветисян Х.К. в своих работах отмечает, что на каждый данный момент продувки количество кислорода в жидкой ванне составляет около одной стотысячной доли от того, которое может освоить ванна³.

Высокая скорость прохождения кислорода через расплав и большое количество элементов способных окисляться приводит к тому, что не все сульфиды и металлы могут взаимодействовать с кислородом одновременно. В первую очередь

³ Шалыгин Л.М. утверждает обратное, считая, что окисление расплавленных сульфидов в дутьевом факеле протекает при местном избытке кислорода [36]

протекают реакции для которых получается наибольшая убыль свободной энергии Гиббса - ΔG (таблица 3).

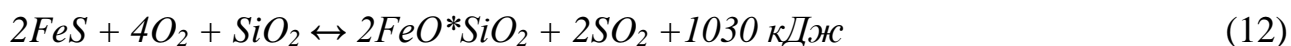
Таблица 3

 ΔG^0 реакций окисления при различных температурах, кДж/моль O_2 [35]

№	Реакция	ΔG^0 при температуре, 0С		
		1100	1200	1300
(1)	$2Fe + O_2 \leftrightarrow 2FeO$	-385,2	-372,0	-359,5
(2)	$2/3FeS + O_2 \leftrightarrow 2/3FeO + 2/3 SO_2$	-236,1	-231,1	-226,0
(4)	$3/2Fe + O_2 \leftrightarrow 1/2Fe_3O_4$	-380,1	-364,3	-348,4
(5)	$2Co + O_2 \leftrightarrow 2CoO$	-310,6	-297,9	-285,5
(6)	$2Ni + O_2 \leftrightarrow 2NiO$	-287,2	-267,9	-248,6
(7)	$4Cu + O_2 \leftrightarrow 2Cu_2O$	-205,0	-188,6	172,1
(8)	$2/3CoS + O_2 \leftrightarrow 2/3CoO + 2/3 SO_2$	-183,7	-175,2	-175,0
(9)	$2/3NiS + O_2 \leftrightarrow 2/3NiO + 2/3 SO_2$	-166,3	-159,1	-154,3
(10)	$2/3Cu_2S + O_2 \leftrightarrow 2/3Cu_2O + 2/3 SO_2$	-162,4	-155,2	-147,0

Как видно из представленной таблицы при прочих равных условиях наибольшее предпочтение имеют реакции окисления железа металлического.

Сравнивая реакции (11, 12) по окислению и ошлакованию железа металлического и сульфидного, отметим, что в реакциях с участием металлического железа тепла выделяется почти в два раза больше. В связи с этим, если в штейне содержится металлическое железо, что характерно для никелевых штейнов, то количество тепла, выделяющегося в ходе экзотермической реакции по сравнению с медными штейнами, тем больше, чем выше содержание в нем металлического железа.



Данное обстоятельство приводит к повышенному тепловому воздействию на огнеупорную футеровку конвертора в начальный период операции набора, когда кирпич еще не нагрелся, а загружаемые холодные присадки не начали плавиться.

Вслед за железом окисляются кобальт и никель, но при присутствии в массе достаточных количеств железа металлического или сульфидного, оксиды этих металлов восстанавливаются и сульфидируются по реакциям (13, 16).





В промышленных условиях заметное окисление кобальта начинается при снижении содержания железа в массе ниже 12 % (рисунок 2). Окисление никеля и переход его в шлак начинается при снижении железа в массе шлака до 1-2 % [37].

В ходе операций конвертирования возможно протекание и множества других реакций, но они носят подчиненный характер.

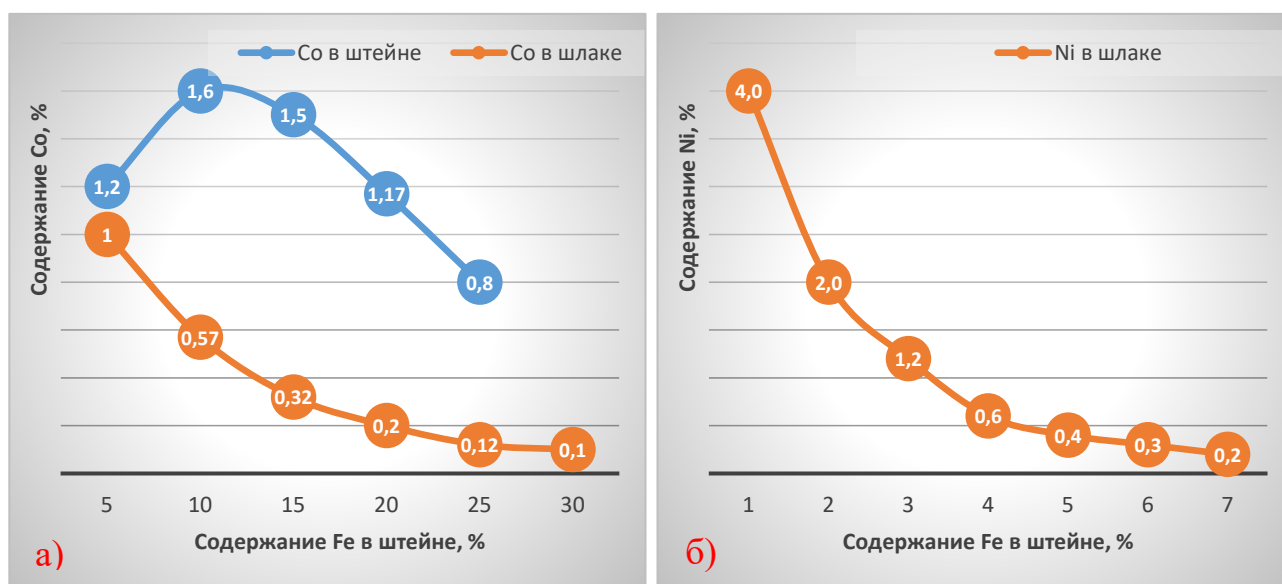


Рис.2. а) содержание $\text{Co}_{\text{штг}}$ и $\text{Co}_{\text{шлл}}$ в зависимости от содержания Fe в штейне [36]
 б) содержание $\text{Ni}_{\text{шлл}}$ в зависимости от содержания Fe в штейне [37]

Скорость конвертирования штейнов лимитируется диффузионной стадией – скоростью диффузии кислорода из внутреннего пространства воздушной струи к ее границе с расплавом, скоростью диффузии кислорода в расплаве, скоростью диффузии сульфидов к поверхности раздела расплава с воздушной струей, скоростью удаления из зоны реакции образующихся оксидов металлов [10].

1.2. СОСТАВ НИКЕЛЕВОГО ШТЕЙНА

Никелевые штейны представляют собой сплав сульфидов и металлов Fe-FeS-Ni-NiS-CoS-CuS. Сумма этих элементов в штейне шахтной плавки находится на

уровне 97-98 %, в том числе до 60 % железа из которых 25-40% в металлической форме. Содержание никеля в штейне обычно 14-18%, содержание кобальта – 0,3-0,8 %. Типовые составы никелевых штейнов различных заводов приведены в таблице 4.

Таблица 4.

Типовые составы никелевых штейнов, %

	Ni	Co	Fe	S	Cu
ЮУНК	16,0-17,5	0,6-0,8	62,0-65,0	18,0-20,0	0,3-0,4
УНК	15,5-16,5	0,4-0,45	60,0-65,0	19,0-21,0	0,1-0,15
РНЗ	12,0-15,0	0,35-0,4	61,0-63,0	20,0-23,0	0,1-0,3

Штейны по своим свойствам существенно отличаются от медных и медно-никелевых штейнов. Уразов Г.Г. и Филин Н.А. установили, что область существования никелевых штейнов ограничена четырехугольником Fe-FeS-Ni₃S₂-Ni тройной системы Ni-Fe-S [38]. Они пришли к выводу, что никелевые штейны не расслаиваются на сульфидную и металлические фазы при любом содержании серы от 0 до 36% и при соответствующей температуре находятся в виде однородного расплава (рисунок 3). К аналогичным заключениям пришли Морачевский А.Г., Рябко А.Г., Цемехман Л.Ш., Вайсбурд С.Е., Ремень Т.Ф. и Шейнин А.Б. исследуя термодинамическую активность железа в системе "железо-никель-сера" при температуре 1300⁰ С [58, 59].

При охлаждении никелевых штейнов в первую очередь выделяются фазы ферроникеля, что составляет определенные трудности в обслуживании ковшей, отстойников и конверторов обеднения.

Плотность никелевого штейна, содержащего 16 % Ni и 17 % S при температуре 1250⁰С, составляет 5,88 кг/м³. С ростом температуры до 1380⁰С плотность штейна снижается до 5,72 т/м³. Интервал температуры плавления лежит в пределах 800-900⁰С.

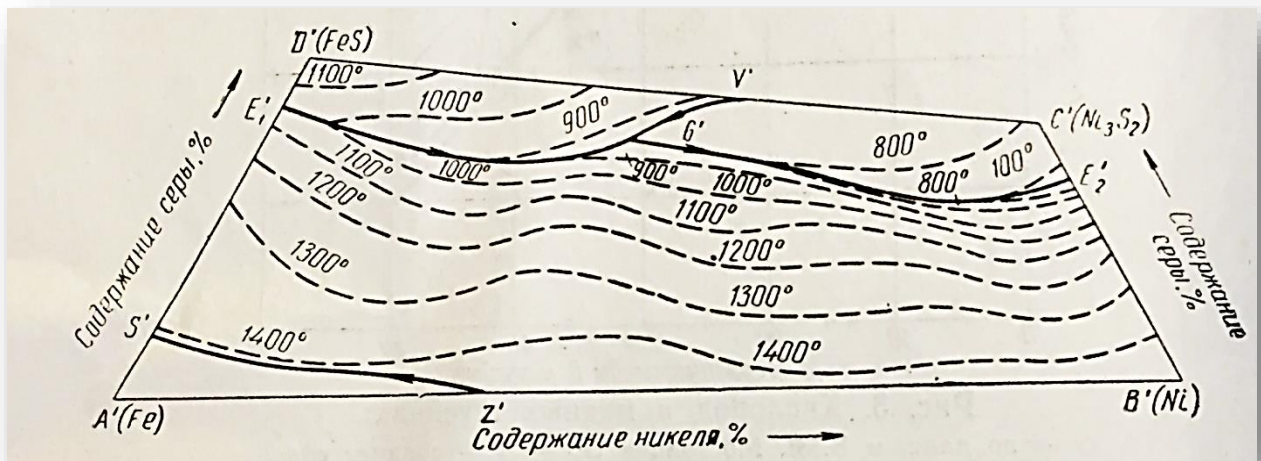


Рис. 3. Изотермы начала кристаллизации по системе Ni-Ni₃S₂-FeS-Fe

Высокую агрессивность штейна к огнеупорной футеровке определяет содержание железа металлического в нем. Эта особенность приводит к тому, что при продувке свежих порций штейна, металлическое железо окислялось в первую очередь из-за более высокого сродства к кислороду по сравнению с другими металлами и соединениями, содержащимися в штейне, разогревает ванну конвертора до 1670⁰С [8]. По данным Шалыгина Л.М., при окислении металлического железа никелевого штейна воздухом температура в факеле на срезе фурмы может превышать 1700⁰С [24].

1.3. СОСТАВ ПРОДУКТОВ ПЕРЕРАБОТКИ

1.3.1 Файнштейн

Конечным продуктом переработки никелевого штейна является файнштейн, содержащий, в основном, сульфиды никеля и примеси меди. Типовые составы никелевого файнштейна показаны в таблице 5. Химический анализ этого продукта показывает, что содержания серы в нем недостаточно для связывания всех металлов в форме сульфидов, в связи с этим часть никеля находится в металлической форме. Микроскопические исследования подтверждают, что застывший файнштейн состоит из двух форм: сульфида никеля и металлического никеля, при этом

доля металлического никеля достигает 20 % и зависит от содержания серы в массе [10].

Таблица 5.

Типовые составы никелевых файнштейнов, %

	Ni	Co	Fe	S	Cu
ЮУНК	77-78	0,4-0,5	0,2-0,3	19-22	0,8-3,5
УНК	78-80	0,4-0,6	0,2-0,35	17-19	0,4-0,7

Образование металлического никеля осуществляется по реакции (17) которая протекает при температуре выше 1300⁰С в период варки файнштейна.



Прямое получение никеля в ходе окисления сульфида кислородом воздуха затруднено термодинамически и вероятно при более высоких температурах конвертирования, превышающих 1500⁰С, которые не могут быть достигнуты на стадии варки файнштейна без обогащения дутья кислородом [39].

Металлический никель в файнштейне ухудшает последующие операции его измельчения перед окислительным обжигом, поэтому при доводке массы стараются не поднимать температуру в конверторе выше 1300⁰С и не передувать расплав, сохраняя в нем серу, что предотвращает образование никеля металлического выше 10 %.

Практически полное удаление железа из расплава при получении готовой продукции и использование для этого высококремнистых шлаков приводит к тому, что образование защитного магнетитового гарнисажа на футеровке конвертора не происходит и она подвергается прямому тепловому и химическому воздействию при конвертировании никелевых штейнов.

1.3.2 Конверторные шлаки

Многочисленные микроскопические исследования конверторных шлаков показывают, что железо в них присутствует, в основном, в двух формах: в виде фаялита ($2FeO \cdot SiO_2$) и магнетита (Fe_3O_4) [10, 11, 14, 34, 40-46, 114]. В небольших количествах железо содержится в качестве сульфида и в виде металла.

Никель находится в шлаках в формах сульфида никеля (Ni_3S_2) и ошлакованного никеля. Первый представлен главным образом включениями механически увлеченного штейна и в небольшом количестве в виде растворенного сернистого никеля. Так как в штейне всегда присутствует никель и железо в металлической форме, то и в запутавшихся в шлаке корольках массы могут присутствовать никель и железо в металлической форме. Ошлакованный никель находится в форме силикатов ($mNiOnSiO_2$), ферритов ($mNiOnFe_2O_3$), шпинелей ($mNiOnAl_2O_3$) и других оксидных соединений.

Кобальт в шлаках - в большей части в ошлакованном виде, замещающий железо в магнетите и фаялите.

Конверторные шлаки никелевых заводов отличаются от медных повышенным содержанием кремнезема 24-29 %, против 21-24 %.

Наряду с содержанием в штейне металлического железа, наличие большого количества диоксида кремния снижает содержание в шлаке магнетита. Как правило, в никелевом шлаке его не более 15 %. В начальной стадии конвертирования - не более 10-12%. Высокое содержание кремнезема, присутствие в шлаке оксида кальция и низкое содержание магнетита делают никелевые шлаки более жидкотекучими и менее вязкими [47, 48].

Плотность конверторного шлака находится на уровне 4,2 – 4,5 т/м³, поверхностное натяжение 30-40 мкДж/см², вязкость – (при T-1250⁰C и 25% SiO₂) равна 1,2Па.

В соответствии с литературными источниками [49-54] и практикой обеднения конверторных шлаков можно утверждать, что в форме химических потерь присутствует примерно 80-90 % кобальта, 50-70% никеля и 10-20% меди, остальные потери являются механическими.

Химический состав шлаков никелевых заводов представлен в таблице 6.

Таблица 6.

Типовой состав никелевых конверторных шлаков, %

	Ni	Co	FeO	S	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO
ЮУНК	1,20	0,3	63,2	0,1	26,0	2,7	2,4	3,2
УНК	0,54	0,4	62,1	0,3	28,4	3,1	2,5	1.6

Низкая вязкость конверторного никелевого шлака и его высокая жидкотекучесть существенно повышают его способность проникать в трещины и неплотности футеровки, пропитывать огнеупоры конвертора, не защищенных магнетитовым гарнисажем. При остывании и последующем нагреве происходит разрушение огнеупора за счет появления дополнительных трещин и скалывания кирпича из-за различий в тепловом расширении огнеупоров и шлака, и нарушения защитных свойств футеровки из-за пропитки их приповерхностного слоя.

1.4. ОСОБЕННОСТИ КОНВЕРТИРОВАНИЯ НИКЕЛЕВЫХ ШТЕЙНОВ

1.4.1 Получение финштейна

Никелевый штейн, получаемый в результате восстановительно-сульфидирующей плавки, в жидком виде в ковшах с использованием мостовых кранов переливается в конвертора набора. Как правило таких конверторов четыре, включая один варочный. По мере продувки расплава воздухом с добавкой кварцевых флюсов его масса уменьшается за счет образования шлака, сливаемого из конвертора и получения серосодержащего газа, удаляемого через горловину и газоходную систему конвертора или на утилизацию, или после пылеочистки, в атмосферу через дымовую трубу.

Для регулирования теплового баланса конвертора используются холодные присадки в виде выломов ковшей, желобов, пропитанных металлом отходов футеровки, металлургических пылей и других оборотов цеха.

Для повышения производительности конвертора за счет использования его автогенности и благодаря удобству технологического обслуживания в него на стадии набора массы загружаются металлические никель-кобальт содержащие отходы.

После слива одного ковша образующегося шлака, в конвертор заливается дополнительная порция штейна и процесс продувки массы повторяется. Обычно на один ковш жидкого штейна в конвертор загружается 2-3 ковша холодных присадок и один ковш отходов. В ходе процесса продувки стараются не накапливать в кон-

верторе более 1-1,5 ковшей шлака, тк переполнение конвертора нарушает его гидродинамический режим, приводит к беспокойному ходу, выбросам расплава через горловину и зарастание ее шлаком. Кроме того, при отсутствии возможности увеличения давления воздушного дутья, переполнение конвертора смещает высокотемпературный фокус воздушного дутья к фурменному поясу и ускоряет его разрушение.

Через 4-5 часов после начала набора и достижения содержания никеля в массе 60-66 % приступают к обеднению этих масс по кобальту снижая его с 1,5-2% до 0,5%. С этой целью на массу, содержащую не менее 66 % никеля и не более 3-5 % железа, заливают одну порцию штейна. За счет окисления новых порций железа металлического и сульфидного конвертор разогревается, что приводит к ускорению роста перехода кобальта в шлак и при добавке флюса образуется дополнительное количество шлака, в который переходит кобальт из массы расплава.

При достаточно высоком содержании кобальта в исходном штейне рафинирование проводят отвальным или печным шлаком, при этом удаление кобальта из массы более эффективно за счет большего количества шлака и меньшего первоначального содержания в нем кобальта. Рафинирование массы ведут до содержания железа не более 3%, что обеспечивает максимальный перевод кобальта в шлак при минимальных потерях никеля.

Принятие решения о способе рафинирования массы от кобальта зависит от состояния конвертора, его футеровки, от содержания кобальта в штейне и массе, наличия бедных по кобальту шлаков, наличием или отсутствием богатых никелевых сухих шлаков, загружаемых в конвертор на варку фاینштейна и требующих предварительного разогрева расплава.

Операция рафинирования осуществляется 2-3 раза и после достижения установленного содержания кобальта весь шлак сливают, конвертор ставят на варку фاینштейна, продувая массу до содержания железа менее 0,8% путем добавки избыточного количества кварца для образования сухого свернутого шлака. При соло-

менном цвете ломковой пробы готовую массу файнштейна сливают из-под свернутого шлака в отстойник для частичного осаждения ферроникеля путем снижения температуры файнштейна на 300-400 °С.

При слое расплава 0,6-0,7 м время отстоя составляет 40-60 минут. После выпуска массы в песчаные изложницы и снятия с них остатков свернутого шлака, содержание железа в файнштейне снижается до 0,2-0,3 %. Технологическая схема конвертирования никелевого штейна представлена на рисунке 4.

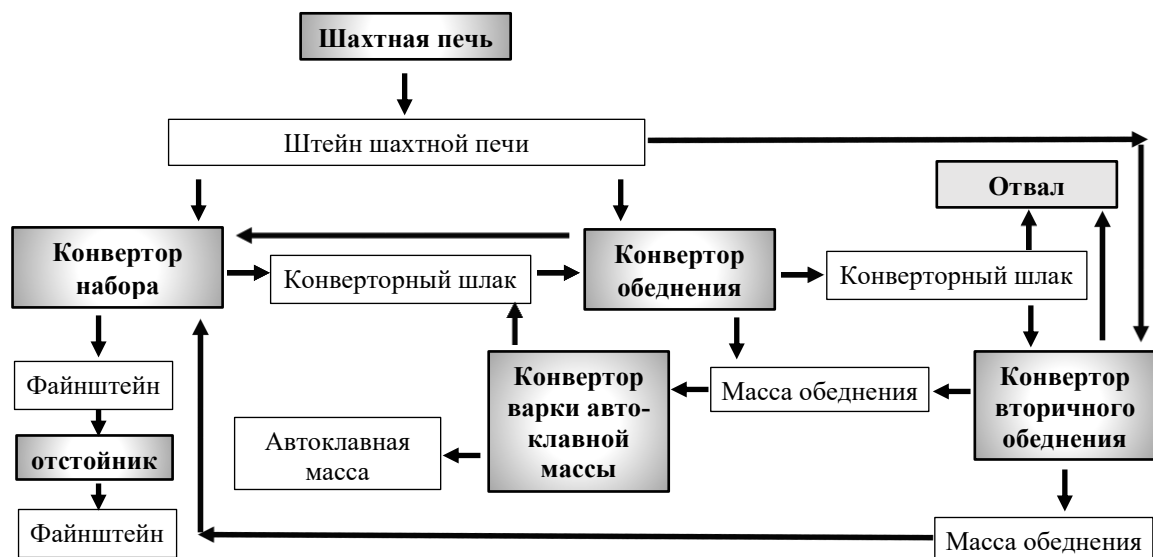


Рис. 4. Схема переработки никелевого штейна и обеднения конверторного шлака

Файнштейн после охлаждения, дробления и измельчения обжигается с целью полного удаления серы, далее подвергается очистке от меди, выщелачиванием ее оксидов. После удаления серы и меди окисленные формы никеля восстанавливаются в электропечи коксиком с получением металлического никеля в качестве готовой продукции.

1.4.2 Практика обеднения конверторных шлаков

Конверторный шлак, получаемый в ходе конвертирования, не является отвальным и подлежит обязательной переработке с целью извлечения из него никеля, кобальта и меди [54]. Из многочисленных способов обеднения шлаков наибольшее

предпочтение отдается обработке его восстановителем и сульфидизатором в электропечи и обеднение методом перемешивания жидких фаз в конверторах. Учитывая то, что настоящая работа связана с увеличением кампании конверторов, то далее будет рассмотрен только вариант переработки шлаков методом перемешивания фаз (рисунок 4).

Суть этого способа заключается в заполнении конвертора, обогреваемого природным газом, двумя-тремя ковшами штейна шахтной печи, переливом в него одного ковша конверторного шлака, продувкой в течении 0,5-2,0 минут воздухом для перемешивания масс и последующем отстое шлака над штейном. После 5-10 минутного отстоя шлак сливается в ковш и по своему составу является отвальным, направляется в отвал.

По мере переработки последующих порций шлака, масса расплава обогащается никелем и кобальтом и обедняется по металлическому железу. Контроль за содержанием цветных металлов в отвальном шлаке на практике проводят через регулярный анализ массы расплава на содержание кобальта.

При достижении содержания кобальта в массе 1,3%, обрабатываемые шлаки становятся оборотными и аналогичным образом обедняются в конверторе вторичного обеднения.

Масса в конверторе первичного обеднения доводится до 4-6% по кобальту и после полного слива шлака переливается в конвертор варки автоклавной массы.

Масса конверторов вторичного обеднения направляется для дальнейшей переработки или в конвертора варки автоклавной массы, или в конвертора набора в зависимости от поставленных задач по балансу никеля между автоклавной массой и файнштейном.

При превышении содержания кобальта в отвальном шлаке установленных лимитов после вторичного обеднения, он охлаждается, измельчается и (в зависимости от его количества) перерабатывается в шахтных печах совместно с основной шихтой или самостоятельно в одной из печей.

Типовой состав продуктов переработки при обеднении конверторного шлака методом перемешивания фаз представлен в таблице 7.

Таблица 7

Типовые составы расплавов и продуктов переработки, %

Продукт переработки	Ni	Co	Fe
Штейн печи	15-17	0,1-0,2	55-60
Шлак конверторный	1,2-7,5	0,1-0,6	42-50
Файнштейн из конвертора	76-78	0,3-0,4	0,6-0,8
Масса конвертора обеднения	20-45	1,3-6,0	35-45
Масса конвертора вторичного обеднения	18-20	0,9-1,3	45-50
Оборотный шлак	0,2-0,6	0,06-0,09	44-50
Отвальный шлак	0,13-0,15	0,05-0,06	44-52
Файнштейн после отстойника	77-78	0,3-0,4	0,2-0,3
Автоклавная масса	60-68	4,0-6,0	3,0-6,0

1.4.3 Получение автоклавной массы

Масса конверторов обеднения объединяется в одном конверторе варки автоклавной массы и путем продувки ее воздухом с добавкой кварцевого флюса доводится до содержания железа 3 - 6 %. После слива конверторного шлака, полученный расплав разливается в изложницы или гранулируется водовоздушной струей. При переработке массы с конверторов обеднения в конвертор добавляются кобальтсодержащие отходы. Подача холодных присадок в конвертор не практикуется в связи с минимальным содержанием металлического железа в расплавах и отсутствия значительного избытка тепла.

1.4.4 Технические показатели процесса конвертирования

Первоначально процесс конвертирования реализовывали в вертикальных конверторах, позднее с развитием конверторов типа Пир-Смит, все процессы переработки стали осуществлять в этом оборудовании. Горизонтальный конвертор (рисунки 5) – цилиндрическая бочка из стальных листов и футерованная внутри огнеупорным кирпичом. Бочка конвертора размещена в двух стальных бандажах, установленных на две пары стальных роликов, позволяющих вращать конвертор вокруг горизонтальной оси.

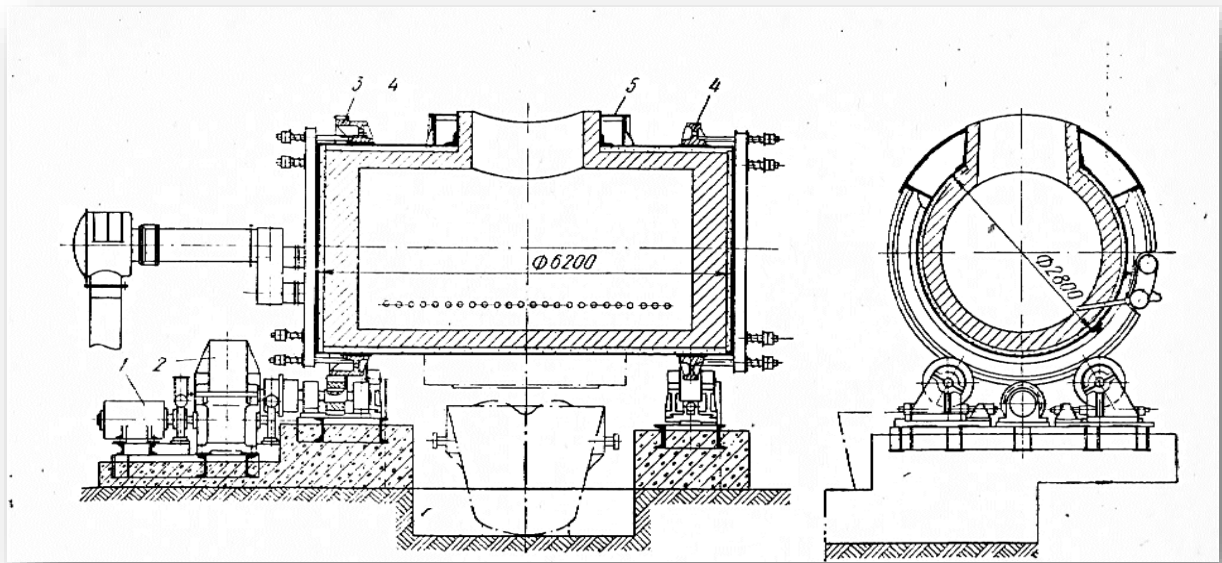


Рис.5. Разрез типового никелевого конвертора емкостью 30 т [10]

С одной стороны, на бочку одет зубчатый венец дающий возможность передавать вращение через промежуточный узел и редуктор от двигателя к конвертору. В центре бочки находится горловина для загрузки расплавов, холодных присадок и отходов, и удаления из конвертора жидких масс с отходящими газами. Торцы бочки крепятся к конвертору через демпферные устройства учитывающих тепловые расширения футеровки при ее нагреве или охлаждении.

Для подачи воздушного дутья в жидкую ванну конвертора последний имеет фурменные приборы в виде фурмоколлектора, фурменных трубок, воздушной задвижки и устройств для прочистки фурм. Конструкция фурмоколлектора определяет производительность конвертора и его рабочую кампанию. Это вызвано тем, что количество подаваемого воздуха в расплав от существующих систем воздухообеспечения определяет скорость протекания химических реакций, а наличие высокотемпературного фокуса в районе фурменных трубок является наиболее часто выходящим из строя узлом конвертора из-за прогара огнеупорной футеровки.

Наиболее удачной, с точки зрения автора, является конструкция фурмоколлектора на конверторах комбината "Южуралникель" (рисунок 6.).

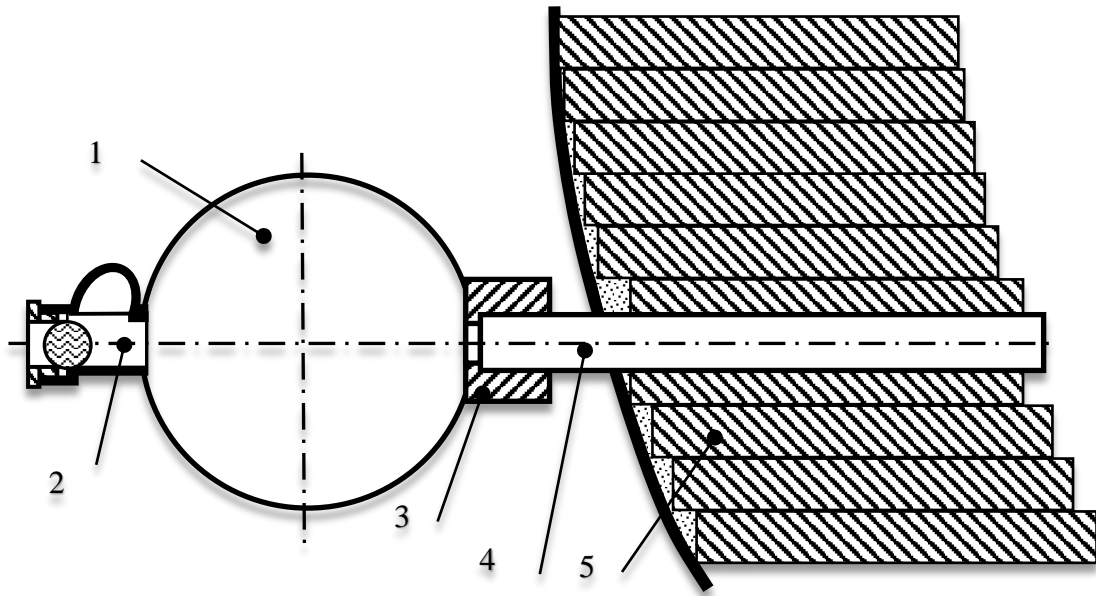


Рис.6. . Конструкция фурмы прямоточной конструкции [10]:

1 – коллектор воздушного дутья; 2 – воздушный клапан; 3 – распределительное устройство; 4- фурменная труба; 7 – футеровка фурменного пояса конвертора.

Представленная конструкция имеет простое строение, высокую ремонтпригодность, минимальное сопротивление воздушному потоку, простоту и легкость обслуживания [11, 24, 36]. Результаты замеров сопротивления воздухоподводящей системы данной фурмы по сравнению с традиционными конструкциями типа коллектор-рукав-фурма показали радикальное снижение гидравлического сопротивления системы конвертора на 9-25 кПа.

Для защиты кожуха бочки от воздействия расплава он защищен огнеупорной футеровкой из хромомagneзитового кирпича. Количество кирпича, затрачиваемого на футеровку 30-ти тонного конвертора, представлено в таблице 8.

После капитального ремонта конвертора по мере износа футеровки проводятся два текущих ремонта с полной заменой фурменного пояса, после проведения которых вновь осуществляется капитальный ремонт. Время между двумя ремонтами определяет кампанию конвертора, которая равна 7-12 суткам.

Таблица 8

Расход огнеупорного кирпича на капитальный ремонт 30 т. конвертора

Элемент кладки	Марка кирпича	шт.	тонн
Торцы контрольные	ХМ-1	770	3,850
Торцы рабочие	ХМ-1	900	4,500
Подина	ХМ-2	184	0,774
	ХМ-3	2254	10,130
Фурменная стенка	ХПТ-5Ф	30	0,44
	ХПТ-5	280	4,530
	ХМ-1	1070	5,35
Свод	ХМ-2	311	1,306
	ХМ-3	1242	5,589
Свод в горловине	ХМ-11	400	1,740
Горловина	ХМ-1	180	0,900
Переход под свод	ХМ-10	135	0,520
		всего	36,629

Технологические показатели работы конверторов при переработке никелевых штейнов в сопоставлении с конвертором переработки медно-никелевого штейна представлены в таблице 9.

Таблица 9

Технологические показатели по переработке Ni и Ni-Cu штейнов

Показатели	Завод 1	Завод 2	Завод 3
Содержание Ni, Ni+Cu, %	16-18	15-18	29
Продолжительность операции, ч	8	12	14-16
Использование конвертора под дутьем, %	60	59,5	56
Переработка холодного в % к шт.	15-25	80-100	40
Расход на 1т фاینштейна			
воздуха, тыс.м ³	10,5	10,3	6,0
огнеупора, кг	108	102	38,5
Прямое извлечение в фاینштейн, %			
Ni	90,2	90,8	92,0
Кампания конвертора, сут.	5-5,8	7-12	40-50

Длительность работы конвертора при переработке медно-никелевых штейнов в разы превышает аналогичный показатель для никелевых и это вызвано особенностями штейна и технологии конвертирования.

1.4.5. Причины низкой кампании конверторов

Конвертирование остается одним из наиболее распространенных процессов в металлургии тяжелых цветных металлов. Плюсы этой технологии заключаются: в автогенности процесса; высокой скорости прохождения металлургических реакций; возможности эффективного получения металлургических продуктов любой степени готовности по содержанию металлов; простоты аппаратного оформления; легкой масштабируемости оборудования и т.д.

К недостаткам конвертирования относятся: трудности утилизации разубоженных отходящих газов; необходимости высокой квалификации обслуживающего персонала, периодичность технологических операций и т.д. Для медно-никелевого производства и, особенно, для переработки никелевых штейнов основным недостатком процесса конвертирования является низкая стойкость огнеупорной футеровки. И если для медных конверторов кампания между текущими ремонтами составляет от 3 до 6 месяцев (в зависимости от содержания меди в штейнах и количества перерабатываемых отходов), то для никелевых конверторов кампания не превышает 12 суток, так на комбинате "Южуралникель" кампания конвертора была на уровне 5,5-8 суток, а на комбинате "Уфалейникель" 7-12 суток.

Эта ситуация складывается из физико-химических особенностей штейна, шлака, металлизированных отходов и технологии процесса конвертирования. Прежде, чем рассматривать пути повышения эффективности работы конвертора, еще раз подробно остановимся на причинах его низкой кампании.

На огнеупорную футеровку конвертора воздействуют ряд факторов: термических (высокая температура и ее резкие колебания), химических (взаимодействие расплава с огнеупором), и механических (прочистка фурм, загрузка крупногабаритных материалов, ломов и холодных присадок, обработка горловины).

1.4.5.1. Термическое воздействие

Отличительной особенностью конвертирования никельсодержащего штейна, полученного при шахтной плавки окисленных никелевых руд, является высокая металлизация последнего. На комбинате "Южуралникель" для 15-16 % штейна по содержанию никеля, количество металлического железа достигало 40% при общем

содержании железа в нем на уровне 60%. Эта особенность приводит к тому, что при продувке свежих порций штейна, металлическое железо окислялось в первую очередь⁴, создает высокие температуры в фокусе горения и в ванне расплава за счет самого большого теплового эффекта из рассматриваемых экзотермической реакции (1-10).

Использование холодных присадок (выломки ковшей и конверторов) для снижения температуры расплава дает незначительный временный эффект, т.к. содержит большое количество металлизированной фазы. Кроме этого, на ряде предприятий при переработке никелевых штейнов, в конверторах попутно перерабатываются металлические отходы, содержащие: 8-20 % Ni, 1- 5 % Co, до 15% Cr, остальное железо. При окислении таких сплавов ванна конвертора разогревается до температуры 1700⁰ С.

Из-за особенностей технологической схемы конвертирования и невысокого содержания никеля в исходных продуктах, приходится перерабатывать большое количество материалов, существенно сокращающихся в объеме по мере обогащения их никелем, что приводит к организации работы с переливами, заключающимися в периодической работе оборудования в период набора (3-4 конвертора) и объединением богатой массы в одном варочном конверторе. Конвертора, как правило, при этом простаивают до новой зарядки свежими порциями штейна. Температура футеровки в этом случае может снижаться с 1300 до 600⁰С.

В течении суток количество теплосмен на конверторе с разницей температур выше 400 ⁰С достигает 4. Конвертора, как правило, футеруются хромомагнетитовыми, периклазошпинельхромитовыми и хромитопериклазовыми огнеупорами термическая стойкость которых при температуре 1300⁰ С не превышает 10-12 теплосмен [55, 56], а для хромомагнетитовых - не более двух. Это создает условия для начала процесса разрушения кирпича уже через 2-3 суток. Кроме того, температура

⁴ Гуревич Е.Я. и Анджапаридзе А.С. утверждают, что в первую очередь окисляется сульфидное железо [60]. С данной точкой зрения трудно согласиться в связи с тем, что в первоначальный период продувки штейна содержание диоксида серы в газах не превышает 1 %, по мере продувки массы и слива шлака в газе начинает появляться SO₂, достигающий 6 - 12 % [10, 11, 35].

начала размягчения огнеупоров начинается от 1490 до 1600⁰ С и при переработке металлизированных отходов кирпич в районе фурменного пояса оплавляется [15, 17, 57].

1.4.5.2. Химическое воздействие

Еще одно обстоятельство ограничивающее кампанию конвертора является работа на шлаки с содержанием 24-28% SiO₂. Это вызвано необходимостью максимально возможного снижения содержания никеля и кобальта в конверторном шлаке за счет уменьшения растворимости оксидов металлов в шлаке и улучшения разделения шлака и штейна за счет снижения удельной плотности шлака.

При таком содержании диоксида кремния количество магнетита в шлаке небольшое и он не "заматывает" огнеупорную футеровку, тем самым исключая образование защитного гарнисажа как на медных конверторах, тем более на стадии варки фэйнштейна при которой содержание железа в расплаве снижается до 0,2-0,8%.

В тоже время низкое содержание магнетита в шлаках делает их жидкотекучими, легко проникающими как в не плотности футеровки, так и пропитывая поверхностный слой огнеупора, что приводит к сколам и трещинам при смене температур и при различном тепловом расширении застывшего расплава и огнеупорного кирпича.

Кислые шлаки с высоким содержанием диоксида кремния могут вступать и в прямое химическое взаимодействие с основной футеровкой из хромомагнетита, растворяя его, переводя оксиды магния и хрома в шлаковую фазу в виде сложных силикатов [15].

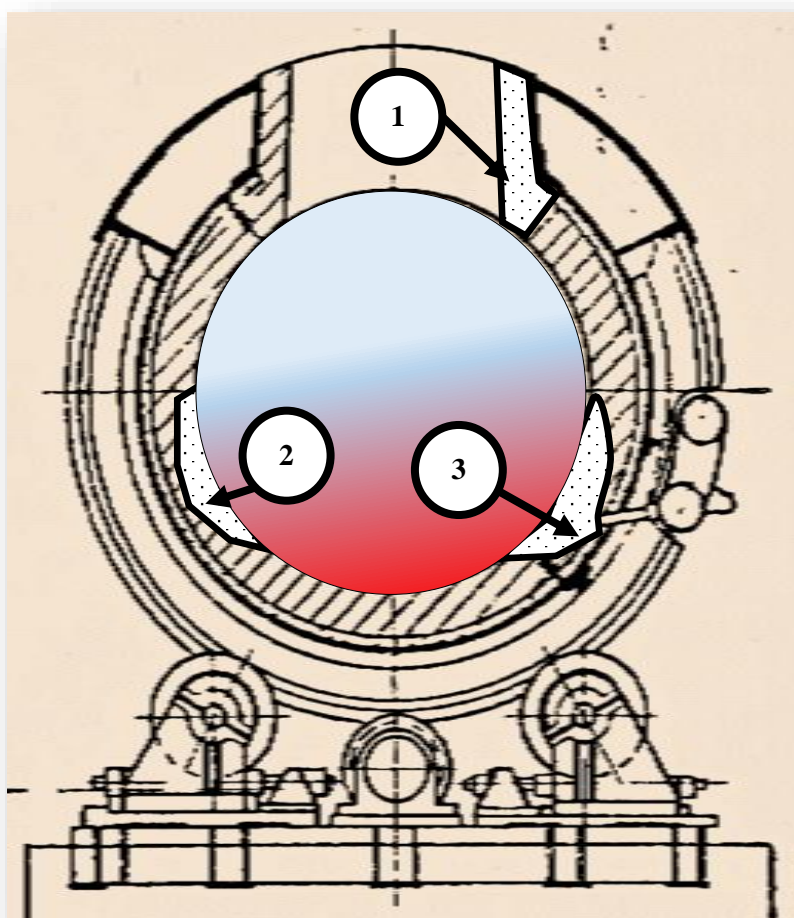
1.4.5.3. Механическое воздействие

Обработка горловины конвертора от настывшей, загрузка крупногабаритных отходов и холодных присадок, удары об горловину конвертора ковшом с целью обрушения корки в ковше с частично застывшим штейном или шлаком и другие случаи механического воздействия на конвертор приводят к выпадению кирпича из футеровки.

Кроме этого при механической прочистке фурм от настывлей на стыке кирпича и среза фурмы происходит отрыв шлаковой корки от огнеупора вместе с его частью, уменьшая тем самым толщину футеровки и оголяя поверхность кирпича для нового агрессивного воздействия расплава.

Характерные нарушения футеровки показаны на рисунке 7. Цветом выделены области где футеровка конвертора разрушается в первую очередь. Таких областей три.

Область 1 связана с разрушением затылочной части конвертора в связи с загрузкой крупногабаритных холодных присадок и металлических отходов, а также



при очистке горловины от настывлей. Данное нарушение футеровки не является критическим и конвертор продолжает эксплуатироваться с постоянным периодическим нанесением защитных материалов в виде глины, кварцевого песка или расплавленного конверторного, иногда, печного шлака.

Рис.7. Области нарушений футеровки:
1-затылок, 2-подина, 3-фурменный пояс.

На комбинате Южуралникель с 1985 года для защиты данной области футеровки применяли литые горловины из хромоникелевого сплава с залитым

кирпичом для снижения ее массы, которые состояли из четырех частей и могли быть заменены как в холодный, так и в горячий ремонт конвертора.

Область 2 (рисунок 7) вызвана разрушением футеровки подины из-за технологических нарушений загрузки отходов в виде металлических болванок весом до 300 кг (по 5-10 шт за одну операцию) и последующим окислением этих материалов. При своевременном обнаружении, данное нарушение огнеупора не приводит к останову конвертора. Путем намораживания тугоплавкого печного шлака на подину после каждого перелива массы и более щадящий режим работы оборудования позволяют продлить работу конвертора до его текущего ремонта.

Критическим разрушением футеровки, определяющим рабочую кампанию конвертора, является область 3 (рисунок 7) – фурменный пояс: нарушение целостности кирпича, прогар фурменных трубок, оголение кожуха конвертора не позволяют дальнейшую эксплуатацию оборудования без угрозы возникновения аварийных ситуаций. Только в крайних производственных ситуациях время работы конвертора можно продлить на 1-2 суток за счет ежесменного намораживания на фурменный пояс печного шлака, глушения прогоревших фурм, заделки кирпичом областей прогара снаружи конвертора, торкретирования огнеупорной массой, переводом наборного конвертора на режим обеднения шлаков с предварительной его обмоткой и другие технологические приемы.

Все работы по продлению кампании никелевого конвертора направлены в первую очередь на защиту фурменного пояса.

1.5 ПУТИ ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ КОНВЕРТОРА

Вопросами повышения эффективности работы конвертора путем увеличения его рабочей кампании ограничиваемой временем работы фурменного пояса, занимаются как отечественные специалисты, так и исследователи за рубежом. Работы в области теории и практики конвертирования никелевых, медных и медно-никелевых штейнов рассмотрены в работах Смирнова В.И., Худякова И.Ф., Цейдлера А.А., Захарова Б.Н., Воробьева В.А., Пименова Л.И., Набойченко С.С., Михайлова В.И., Барсукова Н.М., Русакова М.Р., Гальнбека А.А., Бабаджана А.А., Саттаровой

А.С., Кудрина А.П., Кашеева И.Д., Стрелова К.К., Ежова Е.И., Недвецкого Е.П., 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., Лебединской Н.А., R.G.H. Lee, Paul E. Queneau, Reinhardt, Guy Savard, Резника И.Д., Рябко А.Г., Хомченкова Б.М., Арефьева К.М., Певзнера М.И. и многих других.

Основные пути по увеличению кампании ведутся по следующим направлениям:

- повышение стойкости огнеупора (к высоким температурам, к агрессивному расплаву, большому количеству теплосмен) [16-19];
- использование новых приемов, технологий, оборудования, приспособлений и организации работ для улучшений качества огнеупорной кладки [19-21];
- охлаждение фурменного пояса кессонированными элементами [22, 25-27];
- регулировка обогащения дутья кислородом, параметров воздушного дутья, содержания никеля и железа металлического в штейне [23, 24, 27, 32];
- использование новых конструкций и устройств для подачи воздуха в расплав [22-25, 61-64];
- организация конвертирования с минимальными межоперационными простоями [28, 29];
- обогрев конвертора в период технологического простоя [28];
- контроль за загрузкой и переработкой никельсодержащих отходов;
- торкретирование огневой поверхности футеровки защитными слоями из различных материалов [30, 31].

Наибольший эффект в увеличении длительности кампании конверторов достигнут за счет использования хромитпериклазовых огнеупоров, кладки огнеупора с тепловыми зазорами и засыпки с использованием жидкого стекла, применения закладных кессонов с охлаждением водой под разряжением (ВОПР), организации работ по уменьшению простоя конверторов, обогрева футеровки в период простоя.

Увеличение кампании конверторов на 15-20% было получено при использовании дутья, обедненного по кислороду до 17% [32]. Данное мероприятие было реализовано путем добавки азота в конверторный воздух до заданного уровня содержания кислорода. Практика процесса конвертирования с обедненным дутьем показала, что при заметном росте длительности работы фурменного пояса, наблюдается снижение производительности по перерабатываемым материалам за счет холодного "хода" конвертора. Это обстоятельство ограничило применение технологии конвертирования с обеднением дутья по кислороду.

Перечисленные мероприятия не привели к существенному росту кампании никелевого конвертора набора, которая остается на уровне не выше 12 суток.

По мнению автора настоящей работы, кардинального улучшения защиты фурменного пояса никелевого конвертора можно добиться использованием новой конструкции фурменного прибора, а именно фурмы в защитной оболочке. В качестве защитной оболочки могут быть использованы или инертные по отношению к расплаву газы (например, азот), или воздух под высоким давлением, или паровоздушная смесь, или иные нейтральные газообразные смеси доступные потребителю.

В черной металлургии конструкция фурмы в защитной оболочке (ФЗО) при донном дутье в конвертерах начали применяться с 50-60-х годов прошлого века [61-69]. Эта фурма позволяет использовать попутно вдуваемые газы, как для защиты огнеупорной футеровки конвертера, так и для решения технологических вопросов по рафинированию стали от вредных примесей. В СССР разработкой и первыми полупромышленными испытаниями фурм типа "труба в трубе" занимались И.П. Бардин, С.Г. Афанасьев, М.М. Шумов, З.Д. Эпштейн и Н.И. Мозговой в 1946г. для конвертирования высокофосфористых чугунов. В качестве защитной среды авторы использовали углекислый газ [70, 71]. Работы над фурмой были позднее приостановлены из-за отсутствия близких перспектив передела фосфористого чугуна. По мнению П.П. Арсентьева эта конструкция фурмы и основа процесса были позднее заимствованы зарубежными металлургами [61,72].

За рубежом в 1964г первыми разработчиками и обладателями патента в 1966 г на ФЗО для получения стали были Guy Savard и Robert Lee (компания Liquid Air,

Канада). После большого объема полупромышленных испытаний в Германии на Томасовском конвертере эту конструкцию и технологию запатентовали в 1972 г под названием ОБММ (Oxygen Bottom Metallurgy Maxhutte) [73].

В цветной металлургии первое упоминание о возможности использования ФЗО относится к процессу, разработанному и запатентованному Paul E. Queneau, Reinhardt, Guy Savard и Robert Lee в 1974 г под названием QSOP (Queneau-Schuhmann Oxygen Process) и далее видоизмененном в QSL (Queneau-Schuhmann-Lurgi). Первоначально эта технология планировалась для переработки медного штейна и скрапа, но, в последующем, она была переориентирована на переработку свинцовых концентратов при обогащении дутья кислородом. Практическая реализация процесса была осуществлена в Maxhutte в 1975г.

Отличительными особенностями фурмы, используемой в данных процессах являлась ее сложная механическая конструкция, работающая на давлениях воздушных и кислородных от 500 до 1500 кПа (рисунок 8).

В 90х годах процесс QSL был реализован на следующих предприятиях:

- Cominco Trial, производительностью 120 тыс.т.;
- Berzelius Stolberg, производительностью 80-155 тыс.т. (фото 1);
- Bayin, China, производительностью 52 тыс.т.;
- Korea Zinc, Onsan, производительностью 60-130 тыс.т [73].

В медном производстве первые испытания ФЗО были проведены в 1992г на заводе Union Miniere Hoboken (Бельгия). Опыты были признаны успешными, но несмотря на это, в 1995г завод был реконструирован с использованием процесса Isasmelt [74,75].

В металлургии никеля первые испытания были осуществлены в Канаде на заводе Falconbridge в 1999 г [74,76].

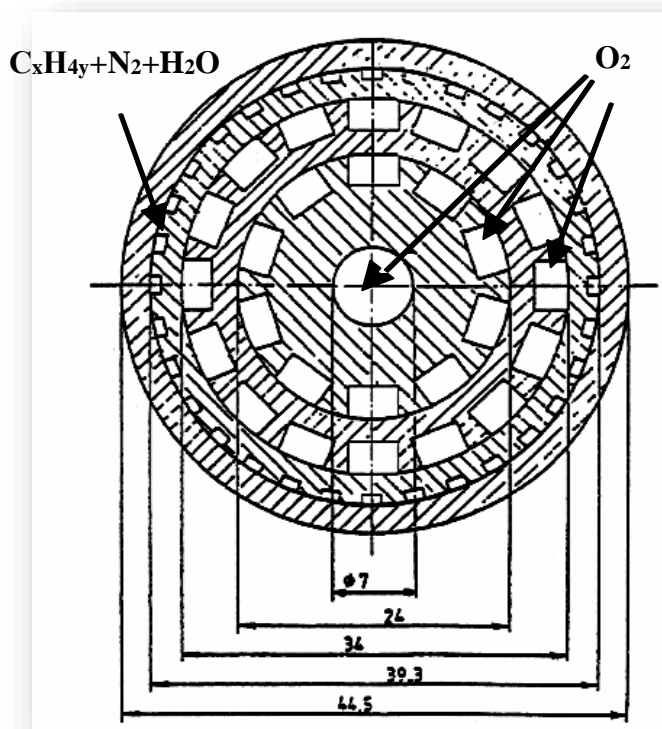


Рис.8 Поперечный разрез фурмы процесса QSL [73]

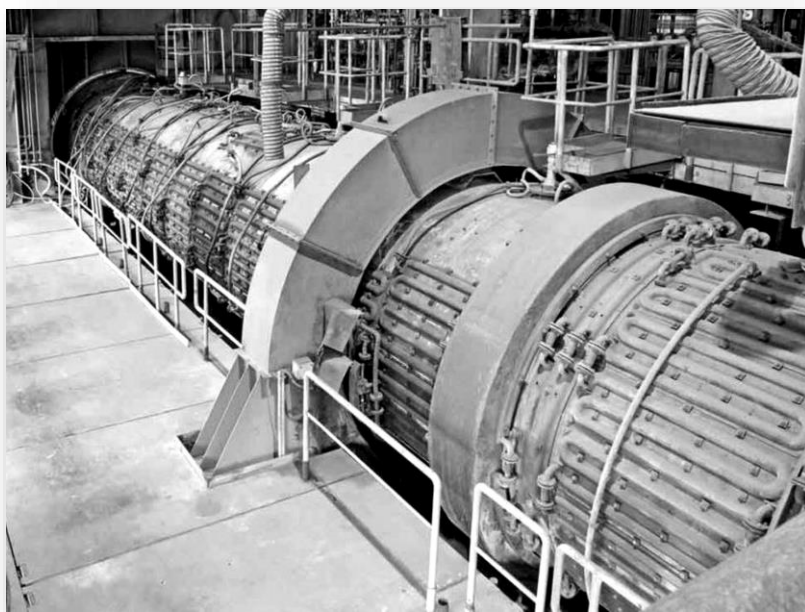


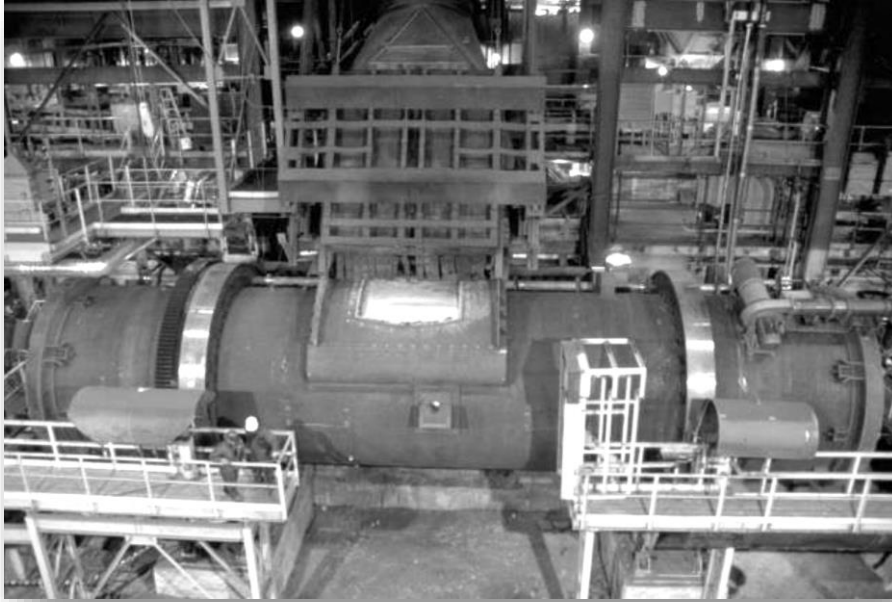
Фото 1. QSL - свинцовый реактор Berzelius Stolberg, Германия

В ходе испытаний содержание кислорода в дутье при переработке медно-никелевых штейнов было доведено до 30%. При этом стойкость огнеупоров не изменилась.

Канадцы дали свое имя этой технологии - ALSI Technology, а конвертор оборудованный этими фурмами получил название SMC (Slag-Make Converting) (фото

2). За период 1999 -2006 гг на данном реакторе были сделаны следующие усовершенствования:

- уровень обогащения кислородом увеличили с 30 до 40%;
- уменьшено количество фурм с 13 до 9;



- уменьшен размер кольцевого зазора на 35%;
- увеличена глубина погружения фурмы в расплав;
- изменены системы подачи материалов и газоудаления [77-79].

Фото 2. SMC реактор, Канада

Дальнейшее развитие технологии конвертирования на основе патента Guy Savard и Robert Lee получило в Китае, где данный процесс получил название SKS. В 1999г в стране был построен завод Shuikoushan для переработки свинцовых концентратов. В настоящее время китайскими компаниями построено более 30 свинцовых заводов по технологии SKS и десять медных [80].

Технология переработки медных материалов на оборудовании SKS была разработана в Китае в 2001г. Первый завод по технологии SKS для переработки медных концентратов был построен во Вьетнаме (фото 3) в 2008г мощностью до 10 тыс. тонн в год [81-83].

Конструкция фурмы и параметры используемого дутья во всех рассмотренных технологических процессах идентичны (рисунок 8).



Фото 3. Вьетнамский медеплавильный завод Dalong [81, 83]

Отличительные особенности процессов заключаются в аппаратном оформлении конверторов, в проведении технологии и степени обогащения дутья кислородом. Главный характерный признак ФЗО, используемых за рубежом, заключается в применении дутья высокого давления на уровне 500-1500 кПа, отсутствие конструктивной возможности прочистки фурм от внутренних и внешних настывлей в случае их образования в процессе конвертирования, сложность изготовления и контроля в ходе эксплуатации элементов фурмы.

В России ФЗО, работающая по аналогичному принципу с высоким давлением дутья и защитной среды, была внедрена на плавильном агрегате "Победа" Медногорского медно-серного комбината в 2015г. Установленные 4 фурмы за счет обогащения дутья кислородом позволили в разы увеличить переработку медного концентрата и клинкера цинковых заводов, при этом кампания конвертора возросла в 1,4-1,5 раза. Конструкция "Победы", пущенной в эксплуатацию в 1995г с обычными фурмами, характерными для медных конверторов, по своим конструктивным размерам и функциональной направленности узлов, практически, не отличается от

китайских SKS реакторов 2000-х годов. В 2016 и 2017 гг установка ФЗО была смонтирована и на всех других конверторах варки меди черновой. Работа по внедрению ФЗО на плавильном агрегате "Победа" и конверторах Медногорского медно-серного комбината проводилась по инициативе Барсукова Н.М. и Булатова К.В. [12].

Первое теоретическое обоснование возможности переработки медно-никелевых руд с применением погруженного в расплав кислородного дутья с применением азота в качестве защитной оболочки были предложены Цемехманом Л.Ш., Ежовым Е.И. и Певзнером М.И. еще в 1978г. [84]. В 1980 г коллектив авторов в составе Недвецкого Е.П., Хомченкова Б.М., Арефьева К.М. и Цемехмана Л.Ш. опубликовал теоретическую методику и основные принципы расчета фурмы в защитной оболочке с результатами исследований на опытном агрегате для плавки сульфидного медно-никелевого сырья [85].

Теоретическое обоснование и разработка конструкции ФЗО для применения на 30-ти тонных конверторах по переработке никелевых штейнов были выполнены автором в 1983г. Далее, конструкция фурменного узла была доработана для практического применения на конверторе, минуя стадию лабораторных и полупромышленных испытаний. В 1987-1988гг в плавильном цехе "Южуралникель" были оборудованы системой ФЗО три конвертора из тринадцати, а, в последующем, до конца 1989г эта система была смонтирована на всех конверторах⁵ [13].

В первоначальный период в качестве защитной среды использовался газообразный азот или компрессорный воздух, или конверторный дутьевой воздух. В 1989 г при участии специалистов проектного института Гипроникель и Ленинградского горного института (Барсукова Н.М., Русакова М.Р. и Гальнбека А.А.) конструкция была доработана с возможностью использования в качестве защитной среды природного газа или паро-водо-мазутной смеси. В 1989 г на конверторе обеднения конверторных шлаков № 7 была запущена установка ФЗО с защитной средой из природного газа [13, 88].

⁵ В работе по внедрению ФЗО принимали активное участие Труханкин А.В., Пичугин В.В., Денисов В.Н., Иванов Т.Т. и Пашковский А.А.

При разработке фурмы в защитной оболочке на комбинате "Южуралникель" были учтены следующие ограничения, существенно предопределившие ее конструкцию и давшие принципиальные отличия от фурмы, запатентованной Paul E. Queneau, Reinhardt, Guy Savard и Robert Lee, а именно:

- отсутствие технической возможности использования воздуха высокого давления для подачи его в качестве основного окислительного реагента;
- отсутствие возможности использования кислорода для обогащения дутья;
- требование обслуживающего персонала и ремонтных служб по упрощению конструкции и возможности ее обслуживания и ремонта в действующем производстве силами дежурных слесарей;
- безопасность эксплуатации с исключением всех рисков, связанных с использованием ФЗО;
- простота и надежность конструкции должны были обеспечить выполнение жестких производственных показателей без остановки производства при монтаже устройства и освоении его в технологическом процессе;
- минимальные затраты на внедрение данного оборудования с использованием только механических служб плавильного цеха.

Азот на установку подавали после разделения воздуха с кислородной станции. Природный газ поступал из системы газоснабжения для отопления конверторов обеднения плавильного цеха. Расход и давления азота и природного газа ограничивали возможность их потребления для защитной среды ФЗО, что наложило определенные ограничения на параметры защитной среды.

Перечисленные ограничения не позволяли использовать конструкции фурменных приборов, используемых в черной металлургии, также, как и фурмы, применяемые в конвертировании медных и свинцовых расплавов для высоких энергетических параметров дутья.

Главная цель использования ФЗО на никелевых конверторах заключалась в увеличении кампании конверторов за счет продления срока службы футеровки фурменного пояса. Идея, заключающаяся в "заворачивании" дутьевого факела инертным газом (азот, природный газ) на выходе из сопла фурмы в расплав была

заимствована из опыта использования ФЗО в черной металлургии [61]. Было предположено, что защитная оболочка позволит сдвинуть высокотемпературный фокус факела вглубь ванны, снизить температуру в области фурменного пояса, исключить местный перегрев огнеупорных изделий и повысить стойкость кирпича.

Перед автором стояли следующие задачи требующие научного, организационного и технического решения:

- выполнить анализ решений и способов защиты футеровки фурменного пояса в пирометаллургии и выделить основные моменты, которые возможно было бы использовать применительно к конверторам для переработки никелевых штейнов;

- выполнить анализ существующих методик по расчету подобных устройств, уточнить (при необходимости - дополнить) методику расчета технологических параметров фурм в защитной оболочке применительно к условиям действующих производств при переработке штейнов цветных металлов;

- разработать конструкцию фурменного прибора для конвертора с учетом и на основании теоретических обобщений и уточненных методик расчета;

- провести адаптацию новой конструкции фурмы к условиям действующего производства;

- провести полупромышленные и промышленные испытания с целью определения влияния новой конструкции фурмы на технико-экономические показатели действующего производства;

- организовать внедрение новой конструкции в действующем производстве по переработке окисленных никелевых руд.

Пути решения научных задач и результаты их воплощения на действующем производстве представлены в следующих главах данной работы.

ВЫВОДЫ

1. Конвертирование никелевых штейнов является одной из основных технологических операций, связанной с переработкой окисленных никелевых руд. К преимуществам конвертирования относятся: автогенность процесса, высокая ско-

рость прохождения металлургических реакций, возможность эффективного получения металлургических продуктов любой степени готовности, простота аппаратного оформления, легкая масштабируемость оборудования и т.д.

Недостатки конвертирования проявляются в трудностях утилизации отходящих газов, требований по высокой квалификации обслуживающего персонала и периодичности технологических операций. Главным и основным недостатком процесса конвертирования является низкая стойкость футеровки, в результате чего кампания конвертора не превышает 12 суток.

2. На огнеупорную футеровку воздействуют ряд факторов в том числе: термических, химических и механических. Традиционные для всех процессов конвертирования они усиливаются по степени влияния на работу конвертора особенностями химического состава перерабатываемых никелевых штейнов, металлизированных отходов и получаемых конверторных шлаков и фанштейна.

3. Использование традиционных средств, методов, способов, материалов и оборудования не позволяют увеличить срок службы огнеупоров в связи с высокими температурами и агрессивностью перерабатываемых расплавов.

4. С целью существенного увеличения кампании конвертора по переработке никелевых штейнов с учетом практического опыта конвертирования в черной металлургии, предложено использовать новую конструкцию фурменного прибора – фурму в защитной оболочке.

5. Для этого требуется разработать методику расчета подобных устройств применительно к используемой технологии конвертирования и с учетом имеющихся возможностей никелевых предприятий.

Фурма в защитной оболочке должна вписаться в существующий комплекс оборудования и не создавать проблемы при ее внедрении и освоении нового технологического процесса конвертирования.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ФЗО

2.1 СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПОДХОДЫ К РАСЧЕТУ ФЗО

Фурмы в защитной оболочке массово применяют в черной металлургии на вертикальных конверторах по производству стали и с недавних пор в цветной металлургии для получения меди и свинца.

В черной металлургии ФЗО используется в основном при донном дутье в кислородно-конверторном процессе. Теоретические основы донного дутья с использованием в качестве защитной среды топлива обобщены в работах Баптизманского В.И., Явойского В.И. Арсентьева П.П., Квитко М.П., Кудрина В.А., Бардина И.П., Мозгового Н.И. Афанасьева С.Г., Сизова А.М., Талдыкина И.А., Колганова Г.С., Казанцева И.Г. и др. [61, 66, 79, 71, 89-93]. В исследованиях этих авторов приведены теоретические основы для расчета донных фурм. Отметим особенности используемых ими методик для конвертирования чугуна в сопоставлении с конвертированием никелевых штейнов.

Арсентьев П.П. с соавторами [61, 92] отмечает, что для обеспечения надежной защиты днища конвертора необходимо удаление высокотемпературной зоны от огнеупоров. Размеры этой зоны и распределение внутри ванны расплава зависят от давления и состава дутья, диаметра сопла и химического состава металла (в основном – от содержания углерода). Была выведена зависимость диаметра (D), длины (L) этой зоны от диаметра сопла (d_c) и критерия Архимеда (Ar) при содержании углерода 1-3 %, формулы (18 и 19).

$$D = 3,47 Ar^{0,313} * d_c \quad (18)$$

$$L = 1,66 Ar^{0,394} * d_c \quad (19)$$

При содержании углерода менее 0,1% эта зависимость иная (20, 21)

$$D = 2,06 Ar^{0,309} * d_c \quad (20)$$

$$L = 2,63 Ar^{0,37} * d_c \quad (21)$$

При этом авторы предполагают, что процессы окисления предпочтительнее проводить в пузырьковом режиме с целью максимального использования кислорода

дутья, отмечая, что изменение положения (глубины погружения) фурм относительно ванны невозможно, также, как и изменение расхода кислорода не влияет на характер окисления элементов. Установка цилиндрических фурм в днище конвертора, независимо от давления смеси перед соплами обеспечивает только критические скорости истечения. Для расчета площади сечения канала фурмы (F) предложена формула (22).

$$F = \frac{\rho_0 * R * T * V}{6000 * P_t * \omega} * \left(\frac{P_t}{P_d}\right)^{\frac{1}{K}} \quad (22)$$

где ω - скорость истечения, м/с;

ρ_0 , - плотность газа при н.у. кг/м³;

P_t , P_d – абсолютное давление в канале фурмы перед соплом и на уровне днища, МПа;

V – расход газа через одну фурму при н.у. м³/мин;

K – показатель адиабаты.

В работах [90, 91] расчет режимов и конструкций фурм, в том числе для донного и бокового дутья рассматривается в условиях режима сверхскоростного истечения струй с числом Маха от 1 до 6. При этом в основу нахождения конструктивных размеров фурмы, положены механизмы возникновения пульсирующего дутья и критических точек по отрыву струи с изменением характера пульсаций.

Расчеты на основе кинетической энергии струи и сил Архимеда [66, 89] учитывают дутье как низких энергетических параметров до 0,01 МПа, так и высоких - более 0,4 МПа, при этом основная цель расчета направлена не на защитные свойства донного дутья, а на режимы перемешивания, обеспечивающие максимальное усвоение ванны кислородом, увеличение перемешивание расплавов. В этой методике лежит поднятие производительности вертикального конвертора и повышения качества получаемой стали.

В цветной металлургии основы расчета конверторных фурм для продувки расплава кислородсодержащим дутьем положили Мостович В.Я., Барабошкин С.Н., Аветисян Х.К., Шалыгин Л.М. и др. В работе [36] представлена методика расчета

как параметров дутья, так и конструктивных размеров фурмы и условий ее применения в действующем производстве.

Движение воздуха в системе с давлениями воздуха и гидростатическим давлением слоя расплава могут быть выражены отношением сил давления и инерции в потоке газа, называемым критерием Эйлера (Eu). Для нормальных условий этот критерий можно представить в следующем виде [36]:

$$Eu = 0,207 * \frac{(P_1 - H_r) * (P_1 + 10^4)}{\omega_0^2 * T_1} \quad (23)$$

где, P_1 - давление⁶ воздуха в коллекторе кг/м²;

H_r – гидростатическое давление слоя расплава, кг/м²;

ω_0 – приведенная скорость воздуха в рассматриваемом сечении, м/с;

T_1 - абсолютная температура воздуха в коллекторе, °K;

Преобразуя формулу (23) через удельный объем воздуха ($V_0^{уд}$) и переводя размерность давления в кг/см² получим зависимость V_0 от давления воздуха в коллекторе, гидростатического давления расплава, температуры и критерия подобия Эйлера.

$$V_0^{уд} = 27,3 \sqrt{\frac{(P_1 - H_r) * (P_1 + 1)}{Eu * T_1}}, \text{ м}^3/\text{см}^2 * \text{мин} \quad (24)$$

В данном выражении критерий Эйлера относительно некоторого сечения системы отражает затраты потенциальной энергии газа к величине приобретенной энергии газом кинетической энергии струи. Соответственно числовое значение (Eu) может служить мерой оценки эффективности гидравлической системы. По физическому смыслу он аналогичен сопротивлению системы (C), чем критерий Эйлера выше, тем нужно большее давление для подачи равного количества воздуха. Исследования на модели и сопоставление их с практической работой конверторов позволили принять значение сопротивления типовой конструкции воздухоподводящей системы в пределах 4-5 [36].

Для определения скорости струи дутья (W), поступающей в расплав предложена формула (25).

⁶ Здесь и далее при ссылке на формулы они приводятся в той же размерности, как и в источнике

$$W = \varphi \sqrt{\frac{2gK}{(K-1)T_0P_0} \frac{P_0T_1}{P_1} \left[1 - \left(\frac{P_1}{P_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]}, \text{ м/с} \quad (25)$$

где, φ – коэффициент, учитывающий потери на преодоление сопротивление воздухоподводящей системы;

K – показатель адиабаты (для воздуха $k=1,4$);

T_0 – абсолютная температура, $^{\circ}\text{K}$;

P_0 – нормальное давление (10300 кг/м^2);

P_1 – абсолютное давление истечения, кг/м^2 ;

Выполненные расчеты и исследования на моделях для условий конвертирования расплавов цветных металлов показали, что воздух поступает в ванну не в качестве отдельных пузырей, как может иметь место в черной металлургии, а в виде сплошного газового факела. Соответственно, струйный характер поступления в ванну окислителя непосредственно влияет на протекание физико-химических процессов.

Для оценки глубины проникновения струи в расплава Казанцев И.Г. предложил критериальную зависимость:

$$\frac{W_x}{W_a} = f\left(\frac{x}{d}, Ar\right) \quad (26)$$

где, W_x – скорость струи по оси фурмы на расстоянии x от устья фурмы, м/с;

W_a – начальная скорость истечения, м/с;

d – диаметр выходного отверстия фурмы, м;

Ar – критерий Архимеда.

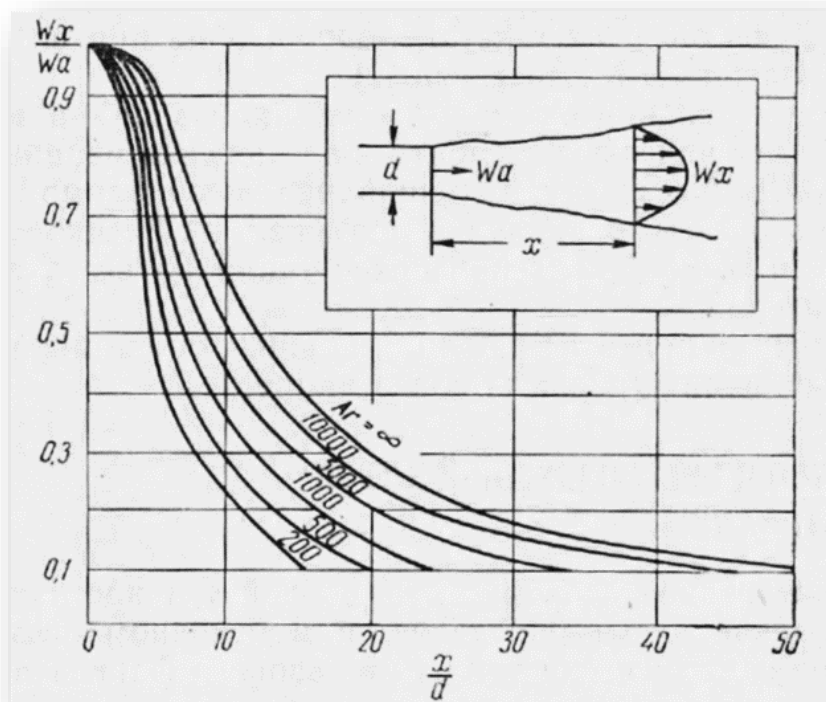
$$Ar = \frac{W_a^2 \gamma_a}{g \gamma_{ж} d} \quad (27)$$

где, γ_a – удельный вес газа в струе при истечении в расплав, кг/м^3 ;

$\gamma_{ж}$ – удельный вес расплава, кг/м^3 .

В соответствии с этими зависимостями и графиком на рисунке 9 можно определить длину (x) погружения (проникновения) факела в расплав в зависимости от диаметра фурмы, скоростей газа, удельной массы газа и расплава.

При истечении струи в расплав к динамическому напору и Архимедовым силам всплытия добавляется температурное расширение газа, величина которого по-



чти мгновенно увеличивается в 4-6 раз. Но несмотря на это, в штейновой ванне расплава горизонтального конвертора зона перемешивания сосредотачивается поблизости от фурменного пояса, что связано с низкими энергетическими параметрами дутья.

Рис.9. Зависимость по формуле (26) по данным [93]

За рубежом методики расчета фурм в защитной оболочке для конвертирования медных штейнов представлены в работах [22, 94-96]. Отличительной особенностью используемых методов расчета, является использование сверхзвуковых скоростей истечения газа из сопла, за счет применения дутья давлением выше 0,5МПа. В формулах (28, 29) для расчета параметров фурмы применяется число Маха как критерия от которого зависит глубина проникновения струи в ванну расплава [95].

$$\frac{4fL}{D_h} = \frac{1-M_i^2}{\gamma M_i^2} + \frac{\gamma+1}{2\gamma} \operatorname{Ln} \left[\frac{(\gamma+1)M_i^2}{2 \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_i^2 \right)} \right] \quad (28)$$

$$\frac{P_i}{P_{ou}} = \frac{1}{M_i} \sqrt{\frac{\frac{\gamma+1}{2}}{1 + \frac{\gamma+1}{2} M_i^2}} \quad (29)$$

где, M_i - число Маха;

f, L, D_h – коэффициент трения, длина и диаметр фурмы, м;

γ - отношение C_p/C_v для газа;

P_i, P_{ou} – плотности газа в фурме и на срезе фурмы, кг/м³;

D_h - гидравлический диаметр фурмы, м.

Для расчета M_i в работе [22, 96] предложено использовать формулу (30):

$$M_i^2 = \sqrt{\left[\left(\frac{P_{ex}}{P_{met}} \right)^{\frac{(k-1)}{k}} \left(\frac{k+1}{2} \right) - 1 \right]} \sqrt{\frac{2}{k-1}} \quad (30)$$

где, P_{ex}, P_{met} - давление газа в коллекторе и на срезе фурмы, МПа;

k – показатель адиабаты для газа.

Для переработки сульфидного медно-никелевого сырья с применением кислородного дутья и азота в качестве защитной среды использована иная модель расчета фурм в защитной оболочке [84, 85]. В основу этого метода положено охлаждение стенки трубы фурмы азотом, расход которого определялся пропорцией к расходу кислорода. Для расчета температур трубок находили величины теплового потока от кладки к поверхности фурмы с учетом закона теплопроводности Фурье:

$$Q = \lambda \frac{dT}{dR} F \quad (31)$$

где, λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м*град;

T, R – температура в блоке и радиус цилиндра, °С, м;

F – площадь поверхности, м².

Теплообмен между потоками газа и поверхностями трубок фурмы за счет конвективной теплопередачи рассчитывался по критериальным соотношениям:

$$Nu = 0,022 Re^{0,8} Pr^{0,43} \quad (32)$$

где, Nu – критерий Нуссельта $\frac{\alpha d}{\lambda}$;

Re – критерий Рейнольдса $\frac{\omega d}{\nu}$;

Pr – критерий Прандтля $\frac{\nu}{a}$,

d – гидравлический диаметр, м;

a – коэффициент температуропроводности газа;

ν – коэффициент кинематической вязкости;

α - коэффициент теплообмена;

ω – скорость газа, м/с.

Конструктивные характеристики фурмы находили из получаемых значений требуемых расходов азота для охлаждения стенки трубы и заданном расходе кислорода по формулам, представленным в работе [36].

Методики расчета конструкций фурм для продувки расплавов, представленные выше, применимы для конкретных условий технологического процесса (конвертирование стали, переработка свинцового и медного сульфидного сырья и тд), используют критерии (число Маха, критерии Нуссельта, Рейнольдса, Прандтля и др) определяющие метод расчета и привязанные к конкретным показателям, используемым в технологии и основаны на различной трактовке процессов в ванне конвертора и способах повышении стойкости футеровки.

По мнению автора, представленные методики расчета фурмы в защитной

оболочке или не применимы⁷ для процессов конвертирования никелевых штейнов или не совсем удобны для практического использования.

В связи с этим и опираясь на методы расчета фурм в работах [36, 61, 97] предложена новая методика расчета, учитывающая контролируемые показатели работы конверторов.

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 предположить, 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.

2.2. МЕТОД РАСЧЕТА ФУРМЫ ТИПА "ТРУБА В ТРУБЕ"

При разработке фурмы в защитной оболочке, состоящей из двух труб, находящихся одна в другой (типа "труба в трубе") были учтены ограничения, имеющиеся на предприятиях, занимающиеся переработкой никелевых штейнов, существенно предопределившие как методику расчета, так и саму конструкцию, а именно:

- ограниченная техническая возможность использования воздуха высокого давления для подачи его в качестве основного окислительного реагента;
- ограниченная возможность использования кислорода для обогащения дутья;
- требование обслуживающего персонала и ремонтных служб по упрощению конструкции и возможности ее обслуживания и ремонта в действующем производстве силами дежурных слесарей;
- безопасность эксплуатации с исключением всех рисков, связанных с использованием ФЗО;

⁷ В черной металлургии, расчет строится на концепции пузырькового режима перемешивания ванны

- простота и надежность конструкции должны обеспечить выполнение производственных показателей без остановки производства при монтаже устройства и освоении его в технологическом процессе;
- минимальные затраты на внедрение нового оборудования и модернизацию технологического процесса.

На основе этих ограничений и с учетом рекомендаций в работах [36, 61, 92, 97] предложена новая методика расчета фурм типа "труба в трубе".

В основе расчета лежит главный посыл, что для ограничения взаимодействия кислорода дутья с расплавом необходимо не допустить их взаимодействие на срезе фурмы. С этой целью вокруг воздушной струи создается поток газа, не допускающего смешение и защищающий воздушное дутье от контакта с металлом.

Для обеспечения этого условия скорость истечения воздуха и защитного газа из фурмы в расплав конвертора должны быть одинаковыми.

Методика представлена рядом последовательных этапов расчетов

1. Определим теоретическую пропускную способность воздушной фурмы в зависимости от давления дутья и температуры воздуха.

Преобразуем уравнение Бернулли – Сен Венана (33) относительно воздуха и получим первое расчетное уравнение (34) для определения теоретической пропускной способности фурмы (V_0).

$$V_0 = F \sqrt{\frac{2k}{k-1} P_\phi \rho \left[\left(\frac{H}{P_\phi} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{H}{P_\phi} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (33)$$

Первое уравнение:

$$V_0 = 0,728 \cdot 10^4 F_{603} C_1 P_\phi \sqrt{\frac{1}{T} \left[\left(\frac{H}{P_\phi} \right)^{1,425} - \left(\frac{H}{P_\phi} \right)^{1,715} \right]}, \text{ м}^3/\text{мин} \quad (34)$$

где, k – показатель адиабаты, для воздуха 1,4;

F_{603} – площадь воздушного отверстия фурмы, м²;

T – абсолютная температура воздуха, $^{\circ}\text{K}$

H – абсолютная величина гидростатического давления слоя расплава, КПа;

$H = (\gamma h \cdot 10^{-2} + 101,30)$, КПа, где γ – плотность расплава, кг/м^3 ,

h – высота слоя расплава, м

P_{ϕ} – абсолютное давление воздуха в коллекторе, КПа

C_1 – коэффициент, учитывающий чистоту фурм, для "чистых" он равен 1, в других случаях от 0,7 до 0,9 и подбирается для каждого конкретного случая в зависимости от технологических особенностей проведения процесса, частоты прочистки фурм и сложившейся практики конвертирования.

2. Для определения давления воздуха на срезе фурмы воспользуемся уравнением Сен-Венана-Венцеля (35) в которое входит неизвестная величина – давление газа на границе сопла и расплава, которую можно рассчитать через преобразование формул абсолютного давления в фурмоколлекторе и уравнения неразрывности потока.

$$\omega = \sqrt{\frac{2k}{(k-1)} RT \left(1 - \left(\frac{H}{P_m}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right)}, \text{ м/с} \quad (35)$$

Абсолютное давление воздуха перед фурмой в фурмоколлекторе P_{ϕ} равно сумме абсолютного давления торможения перед срезом фурмы P_m и потерь на трение в канале фурмы P_{mp} : $P_{\phi} = P_m + P_{mp}$, КПа

Потери давления на трение в канале фурмы определяем по формуле из работы [97]:

$$P_{mp} = \lambda \frac{L}{d_r} \rho_{cp} \frac{\omega_{cp}^2}{2} 10^{-3}, \text{ КПа} \quad (36)$$

где: λ – коэффициент трения, являющийся функцией критерия Рейнольдса

и для стальной трубы равен 0,04;

L – длина фурменной трубы, м;

d_r – гидравлический диаметр фурмы, м;

$\rho_{\text{ср}}$ – средняя плотность воздуха в канале фурмы, кг/м³;

$\omega_{\text{ср}}$ – средняя скорость газа в канале фурмы, м/с.

Среднюю плотность воздуха в канале фурмы рассчитываем по формуле

$$\rho_{\text{ср}} = \rho_0 \frac{P_{\text{ср}} T_0}{P_0 T}, \text{ кг/м}^3 \quad (37)$$

где: ρ_0 , T_0 и P_0 – плотность, температура и давление воздуха при нормальных условиях, кг/м³, К, КПа соответственно;

T – температура воздуха в канале фурмы, К;

$P_{\text{ср}}$ – среднее давление воздуха в канале фурмы, равное $(P_{\text{ф}} + P_{\text{т}})/2$, КПа;

Из уравнения неразрывности потока находим среднюю скорость воздуха в канале фурмы:

$$\omega_{\text{ср}} = \frac{V_0 \rho_0}{\rho_{\text{ср}} F}, \text{ м/с} \quad (38)$$

Преобразовывая уравнения (36-38) относительно P_m для $P_0 = 101,3$ КПа и $T_0 = 273$ °К, выведем вторую зависимость (39) для определения давления воздуха на срезе фурмы.

Второе уравнение:

$$P_m = \sqrt{P_{\text{ф}}^2 - 3,7 \cdot 10^{-4} \cdot \lambda \frac{L}{d_2} \frac{\rho_0 V_0^2 T}{F^2}}, \text{ КПа} \quad (39)$$

3. Для определения скорости истечения воздуха из канала фурмы используем уравнение Сен Венана - Венцеля (35) с выведенной нами зависимостью P_m (39).

Третье уравнение:

$$\omega = C_1 \sqrt{7RT \left(1 - \left(\frac{H}{P_m}\right)^{0,2875}\right)}, \text{ м/с} \quad (40)$$

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

C_1 – коэффициент, характеризующий чистоту фурмы, равен 0,7-1,0

4. При известной скорости истечения воздушной среды, найдем давление торможения на срезе фурмы для защитной среды по формуле (41) для условия равенства скоростей истечения воздуха и газа.

Четвертое уравнение:

$$P_t^{азот} = \frac{H}{\left[1 - \frac{(k^{азот} - 1)\omega^2}{2k^{азот} R^{азот} T^{азот}} \right]^{\frac{k^{азот}}{k^{азот} - 1}}}, \text{ КПа} \quad (41)$$

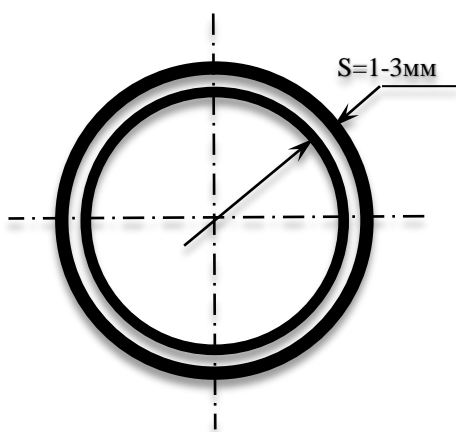
где: $K^{азот}$ константа адиабаты, для азота - 1,4;

$R^{азот}$ – газовая постоянная, для азота 296,9 Дж/(кг*К).

5. Для расчета необходимого количества защитного газа необходимо задаться величиной межтрубного зазора и диаметром наружной трубы, исходя из условий и конструктивных особенностей используемой огнеупорной футеровки.

Практика использования ФЗО в черной и цветной металлургии показала то, что, как правило, ширина щели между трубами составляет 1-3 мм (рисунок 10). Это связано как с параметрами возможного расхода и давления защитного газа, так и со сложностью и особенностями изготовления, монтажа и обслуживания фурм.

Площадь щели рассчитываем по формуле (42).



Пятое уравнение:

$$F_{щели} = \frac{\pi}{4} (d_{внеш}^2 - d_{вн}^2), \text{ м}^2 \quad (42)$$

где: $d_{внеш}$ – внутренний диаметр внешней трубы, м;

$d_{вн}$ – внешний диаметр внутренней трубы, м.

Рис.10. Труба в трубе

6. Для расчета количества азота, которое можно подать через щель в качестве защитной среды, рассчитаем плотность потока азота в канале фурмы на ее срезе.

Шестое уравнение:

$$\rho^{азот} = \frac{P_m^{азот}}{R^{азот} T^{азот}} 10^3 \left(\frac{H}{P_m^{азот}} \right)^{\frac{1}{k}}, \text{ кг/м}^3 \quad (43)$$

7. Преобразовывая формулу (37), относительно расхода газа на срезе фурмы получим зависимость (44) позволяющую рассчитать расход защитной смеси:

Седьмое уравнение:

$$V_{азот} = \frac{\omega \rho^{азот} F_{щели}}{\rho_0}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (44)$$

8. Преобразовывая формулу (39), рассчитаем необходимое абсолютное давление азота перед фурмоколлектором.

Восьмое уравнение:

$$P_{азот} = \sqrt{P_m^{азот2} + 3,7 \cdot 10^{-4} \cdot \lambda \frac{L}{d_{щели}} \frac{\rho_0 V_{азот}^2 T_{азот}}{F_{щели}^2}}, \text{ КПа} \quad (45)$$

Выведенные из уравнений Сен Венана-Венцеля, Бернулли–Сен Венана и неразрывности потока восемь последовательных формул позволяют рассчитать технологические параметры фурмы типа "труба в трубе", где по внутренней трубе подается воздушная смесь, а по кольцевому зазору защитный газ. На основании полученных технологических показателей делается расчет конструкции фурменного прибора.

2.3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕДЛОЖЕННОЙ МЕТОДИКИ

Представленная методика расчета конструкций типа "труба в трубе" для фурм в защитной оболочке, позволяет применить ее для определения параметров и конструкции фурменного прибора для 30-ти тонного конвертора по переработке никелевых штейнов. В качестве защитной среды для данного примера принят – азот.

С учетом ранее принятых ограничений по недопущению усложнения конструкции существующих фурм и способов кладки огнеупоров, предложено взять за основу существующие воздушные фурмы⁸. Для данного используемого типа конверторов была принята щель, равная 2 мм. Щель меньшего размера, создает проблемы с монтажом фурменных трубок при ремонте конвертора силами дежурного персонала, а при большем размере, происходит нерациональное увеличение расхода азота, усложнение подводящих коммуникаций и удорожание себестоимости конвертирования.

При применении на конверторе в качестве фурмы воздушной трубы диаметром 40мм и толщиной стенки 4 мм, для обеспечения зазора 2 мм требуется использовать стальную трубу для подачи защитной среды с внутренним диаметром 52 мм и наружным - 60мм.

В качестве исходных данных для расчета примем: длину фурмы $L=0,5$ м; ее диаметр $d=0,04$ м; температуру воздуха $T=333$ °К, при давлении воздуха в воздушной системе конвертора перед задвижкой 111,4 КПа, абсолютное давление воздуха в фурмоколлекторе P_ϕ составит 212,7 КПа; удельный вес расплава над фурмами $\gamma=5 \cdot 10^3$ кг/м³; высоту расплава над фурмами $h=0,6$ м.

По первому уравнению найдем расход воздуха на фурму:

$$V_0 = 0,728 \cdot 10^4 \cdot 3,14 \cdot 0,04^2 \frac{1}{4} \cdot 1 \cdot 212,73 \sqrt{\frac{1}{333} \left[\left(\frac{131,3}{212,73} \right)^{1,425} - \left(\frac{131,3}{212,73} \right)^{1,715} \right]}, \text{ м}^3/\text{МИН}$$

Откуда V_0 равно 27,3 м³/мин.

По второму уравнению определим абсолютное давление воздуха на срезе фурмы:

⁸ Расчет можно провести и от обратного, зная ограничения по параметрам используемого воздуха и азота, можно рассчитать требуемые конструктивные характеристики фурмы, но это может привести к существенным отклонениям от уже используемых конструкций и полной реконструкции всей воздухоподводящей системы и технологии огнеупорной кладки, включая применение других марок огнеупоров. В случае проектирования и изготовления нового конвертора, такой подход целесообразен и рационален.

$$P_m = \sqrt{212,7^2 - 3,7 \cdot 10^{-4} \cdot 0,04 \frac{0,5}{0,04} \frac{1,29 \cdot 27,31^2 \cdot 333}{0,001256^2}}, \text{ КПа}$$

В результате P_m равно 186,6 КПа.

По третьему уравнению рассчитаем скорость истечения воздуха из канала фурмы:

$$\omega = 1 \cdot \sqrt{7 \cdot 287,14 \cdot 333 \cdot \left(1 - \left(\frac{131,3}{186,6}\right)^{0,2875}\right)}, \text{ м/с}$$

Отсюда ω равна 253 м/с.

По четвертому уравнению найдем необходимое давление азота на срезе фурм для обеспечения равенства скоростей воздуха и азота:

$$P_m^{азот} = \frac{131,3}{\left[1 - \frac{(1,4-1) \cdot 253^2}{2 \cdot 1,4 \cdot 296,9 \cdot 313}\right]^{\frac{1,4}{1,4-1}}}, \text{ кПа}$$

Соответственно $P_m^{азот}$ равно 277,7 КПа

По пятому уравнению определим площадь щели:

$$F_{щели} = \frac{\pi}{4} (0,052^2 - 0,048^2) = 0,000314 \text{ м}^2$$

Шестое уравнение используем для расчета плотности азота на срезе фурмы:

$$\rho^{азот} = \frac{277,7}{296,9 \cdot 313} 10^3 \left(\frac{131,3}{277,7}\right)^{\frac{1}{1,4}} = 1,75 \text{ кг/м}^3$$

Седьмое уравнение позволяет определить объем защитной смеси – азота:

$$V_{азот} = \frac{253 \cdot 1,75 \cdot 0,000314}{1,25} = 0,111 \text{ м}^3/\text{с} \text{ или } 6,7 \text{ м}^3/\text{мин}$$

С помощью восьмого уравнения рассчитаем необходимое абсолютное давление азота в фурмоколлекторе:

$$P_{азот} = \sqrt{277,7^2 + 3,7 \cdot 10^{-4} \cdot 0,04 \frac{0,5}{2 \cdot 0,002} \frac{1,25 \cdot 0,111^2 \cdot 313}{0,000314^2}}, \text{ КПа}$$

Отсюда $P_{азот}$ равно 409,7 КПа.

В результате расчетов для ФЗО с внутренним диаметром трубы по воздушной смеси, равным 40 мм и шириной щели 2 мм, получим расход воздуха на одну фурму - 27,3 м³/мин, расход азота – 6,7 м³/мин. Минимальное необходимое давление воздуха на фурмоколлекторе должно составлять – 0,11 МПа, давление азота 0,3 МПа. Данные параметры обеспечивают скорость истечения воздуха 253 м/с.

2.4. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ФЗО В ТАБЛИЧНОМ РЕДАКТОРЕ EXCEL

С целью удобства практического использования представленной методики для расчетов с использованием современного программного обеспечения ниже представлена ее математическая модель с использованием табличного редактора Excel. Для наглядности предоставления информации, формулы не оптимизированы по ссылке на предыдущий результат расчета. Аналогично, ячейки с исходными и промежуточными данными расположены произвольно и могут быть уточнены пользователем исходя из формы предоставления информации и удобства ее анализа.

Математическая модель расчета ФЗО:

1. Расчет удельного количества воздуха, продуваемого через одну фурму в расплав - V_0 (м³/с)

$$V_0 = 7280 * K13 * J13 * \text{СТЕПЕНЬ}(\text{СТЕПЕНЬ}((I10 * J10 / 100 + 101,3) / J13; 1,425) - \text{СТЕПЕНЬ}((I10 * J10 / 100 + 101,3) / J13; 1,715)) / L13; 0,5 * W13 \quad (46)$$

где ячейки:

$K13$ – площадь внутреннего отверстия воздушной фурмы, м²;

$J13$ – абсолютное давление воздуха в фурмоколлекторе, КПа;

$I10$ – высота уровня расплава над фурмами, м;

$J10$ – плотность расплава, кг/м³;

$L13$ – температура дутьевого воздуха, °К;

$W13$ - безразмерный коэффициент, учитывающий "чистоту" фурмы, равный единице для "чистых" фурм и 0,7-0,9 для фурменного канала до его прочистки, подбирается опытным путем для каждого конкретного конвертора в зависимости от технологических особенностей проведения процесса, частоты прочистки фурм и сложившейся практики конвертирования.

2. Скорость воздуха на срезе фурмы - ω , м/с;

$$\omega = \text{СТЕПЕНЬ}((1 - \text{СТЕПЕНЬ}(I21 / (\text{СТЕПЕНЬ}((H18 * H18) - ((L18 * N18 * N18 * P18 / Q18) / Q18 * J18 / K18 * I18 / 10000 * 3,7); 0,5))); (H21 - 1) / H21)) * K21 * L21 * 2 * H21 / (H21 - 1); 0,5) * W13 \quad (47)$$

где ячейки:

$I21 = (I10 * J10 / 100 + 101,3)$ – абсолютное гидростатическое давление расплава над фурмами, КПа;

$I18$ - λ – коэффициент трения;

$H18$ – абсолютное давление воздуха в коллекторе, КПа;

$L18$ – плотность воздуха, кг/м³;

$N18$ – удельное количество воздуха, м³/с;

$P18 = L13$; $Q18 = K13$;

$J18$ – длина фурменной трубы, м;

$K18$ – внутренний диаметр воздушной трубы, м;

$H21$ – постоянная адиабаты для воздуха;

$K21$ – газовая постоянная для воздуха, Дж/(кг*К); $L21 = L13$.

3. Давление воздуха на срезе фурмы – P_m , КПа

$$P_m = \text{СТЕПЕНЬ}((H18 * H18) - ((L18 * N18 * N18 * P18 / Q18) / Q18 * J18 / K18 * I18 / 10000 * 3,7); 0,5) \quad (48)$$

4. Расход азота через щель, м³/с

$$V_{азот} = J24 * (\text{СТЕПЕНЬ}((I21 / (I21 / (\text{СТЕПЕНЬ}((1 - (H24 - 1) / 2 * H24 / K24 / L24 * J24 * J24); H24 / (H24 - 1))))); (1 / H24)) * 1000 * (I21 / (\text{СТЕПЕНЬ}((1 -$$

$$\frac{(H24-1)/2 * H24 / K24 / L24 * J24 * J24; H24 / (H24-1))}{K24 / L24} * (3,14 * (J29 * J29 - H29 * H29) / 4) / M29 \quad (49)$$

где ячейки:

$J24$ – ω , скорость воздуха на срезе фурмы, м/с;

$H24$ – постоянная адиабаты для азота;

$K24$ - газовая постоянная для азота, Дж/(кг*К);

$L24$ – температура азота, °К;

$J29$ - внутренний диаметр внешней трубы, м;

$H29$ – внешний диаметр внутренней трубы, м;

$M29$ - плотность газа при нормальных условиях, кг/м³.

5. Абсолютное давление азота в азотном коллекторе, МПа

$$P_{азот} = \text{СТЕПЕНЬ}(((I24 / (\text{СТЕПЕНЬ}((1 - (H24-1)/2 * H24 / K24 / L24 * J24 * J24); H24 / (H24-1)))) * (I24 / (\text{СТЕПЕНЬ}((1 - (H24-1)/2 * H24 / K24 / L24 * J24 * J24); H24 / (H24-1)))))) + ((L32 * N32 * N32 * L24 / (3,14 * (J29 * J29 - H29 * H29) / 4)) / (3,14 * (J29 * J29 - H29 * H29) / 4) * J18 / K32 * I32 / 10000 * 3,7); 0,5) \quad (50)$$

где ячейки:

$I24 = I21$; $L32$ – плотность азота при н.у, кг/м³; $N32 = V_{азот}$;

$R32$ – гидравлический диаметр 2мм щели, равный 2х2мм/1000, м;

$I32 = \lambda$ – коэффициент трения;

Математическая модель с относительными ссылками представлена ниже:

$$V_0 = ((\text{СТЕПЕНЬ}(I13/J13; 1,425) - \text{СТЕПЕНЬ}(I13/J13; 1,715)) / L13)$$

$$\omega = \text{СТЕПЕНЬ}((1 - \text{СТЕПЕНЬ}(I21/J21; (H21-1)/H21)) * K21 * L21 * 2 * H21 / (H21-1); 0,5) * W13$$

$$P_m = \text{СТЕПЕНЬ}((H18 * H18) - (3,7 * (L18 * N18 * N18 * P18 / Q18) / Q18 * J18 / K18 * I18 / 10000); 0,5)$$

$$F_{щели} = 3,14 * (J29 * J29 - H29 * H29) / 4$$

$$P_m^{азот} = I24 / (\text{СТЕПЕНЬ}((1 - (H24-1)/2 * H24 / K24 / L24 * J24 * J24); H24 / (H24-1)))$$

$$\rho^{азот} = \text{СТЕПЕНЬ}((I24 / H27); (1 / H24)) * 1000 * H27 / K24 / L24$$

$$V_{азот} = F21 * F27 * L29 / M29$$

$$P_{азот} = \text{СТЕПЕНЬ}((F24 * F24) + ((L32 * N32 * N32 * P32 / Q32) / Q32 * J32 / K32 * I32 / 10000 * 3,7); 0,5)$$

ВЫВОДЫ

1. Анализ известных методик для расчета фурм типа "труба в трубе" с защитной оболочкой, снижающей агрессивное воздействие окислительного дутья и расплава на огнеупорную футеровку конвертора используемых в черной и цветной металлургии показывает, что они имеют определенные ограничения и недостатки при их прямой адаптации к конвертированию никелевых штейнов.

В связи с этим была разработана новая методика расчета ФЗО, опирающаяся на базовые уравнения в теории гидравлических процессов, наиболее приемлемые моменты и подходы в данном вопросе, используемые как в цветной, так и в черной металлургии.

2. Главной отличительной особенностью разработанной методики является принятие скорости кислородосодержащего дутья равной скорости потока защитного газа. Такой подход позволяет предположить о максимально длительном временном периоде и на большем расстоянии движение двух потоков с минимальным взаимным перемешиванием в ванне расплава на выходе из фурмы.

Ограничение взаимодействия кислорода дутья с расплавом в первоначальный момент, позволяет предположить об ограничении скорости реакций окисления и, соответственно, снижению агрессивного воздействия расплава на фурменный пояс конвертора.

3. Разработанная методика состоит из восьми последовательно выполняемых расчетов по предложенным формулам, позволяющих определить основные технологические параметры ФЗО, являющихся основой для обоснования конструкции фурменного прибора.

Методика позволяет делать расчет как от технологических параметров к конструкционным, так и наоборот - от приемлемой конструкции для производства к требуемым технологическим критериям энергетических ресурсов.

4. В соответствии с этой методикой на первом этапе рассчитывается объем воздушного дутья, подаваемого через фурму. Далее рассчитываются параметры дутья (давление и скорость) на срезе фурмы для штейновых и шлаковых расплавов.

При принятии равенства скоростей воздушного дутья и защитного газа, возможно рассчитать параметры защитной среды на входе ее в расплав, что позволяет, в свою очередь, получить требуемые параметры защитного газа на входе в фурменный прибор.

5. Для практического использования рассматриваемая методика расчета показана в виде математической модели на базе программного обеспечения табличного редактора Excel. Математические зависимости позволяют эффективно и просто проводить расчеты модели при любых исходных данных и для множества вариантов соотношения технологических и конструкционных параметров.

В модели показаны два варианта зависимостей: без относительных ссылок для наглядности применяемых формул для расчетов; с относительными ссылками – существенно упрощающими формулы и способ их написания.

ГЛАВА 3. КОНСТРУКЦИЯ ФЗО

3.1. ТРЕБОВАНИЯ К КОНСТРУКЦИИ

На основании полученных технологических показателей можно приступить к определению самой конструкции фурменного прибора. При этом необходимо учитывать следующее:

- имеющиеся конструкции фурменных приборов на конверторах;
- наличие на участке и величину давления технологического воздуха, защитного газа, возможности их изменения при разумных затратах;
- схему кладки огнеупоров и марки применяемого кирпича;
- организацию и технологии проведения работ по ремонту конверторов;
- возможности ремонта и обслуживания ФЗО;
- соблюдение правил техники безопасности и безопасного проведения работ как во время ремонта, так и при последующей эксплуатации;
- возможность обогащения дутья кислородом;
- простота и надежность конструкции должны обеспечить выполнение производственных показателей без остановки производства при монтаже устройства и освоении его в технологическом процессе;
- минимальные затраты на внедрение нового оборудования и модернизацию технологического процесса.

При расчете конструкции фурмы в защитной оболочке для условий комбината "Южуралникель" принято:

- существующая конструкция фурмоколлектора (рисунок 6.) принята за основу, как наиболее эффективное устройство для подачи воздуха в расплав;
- давление конверторного воздуха не превышает 0,12 МПа, давление азота для защитной среды – 0,3 МПа, давление природного газа не более 0,25 МПа;
- фурменный пояс выкладывается в один ряд кирпичом ХПТ-5 и ХПТ-5Ф;
- ремонт футеровки осуществляется с полным или частичным удалением старой кладки;
- отсутствие возможности обогащения дутья кислородом.

3.2. ФУРМА В ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКЕ

На основании разработанной методики расчета ФЗО для никелевого конвертора и с учетом указанных ограничений и допущений была разработана новая конструкция фурменного прибора (рисунок 11).

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 2 мм. 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).

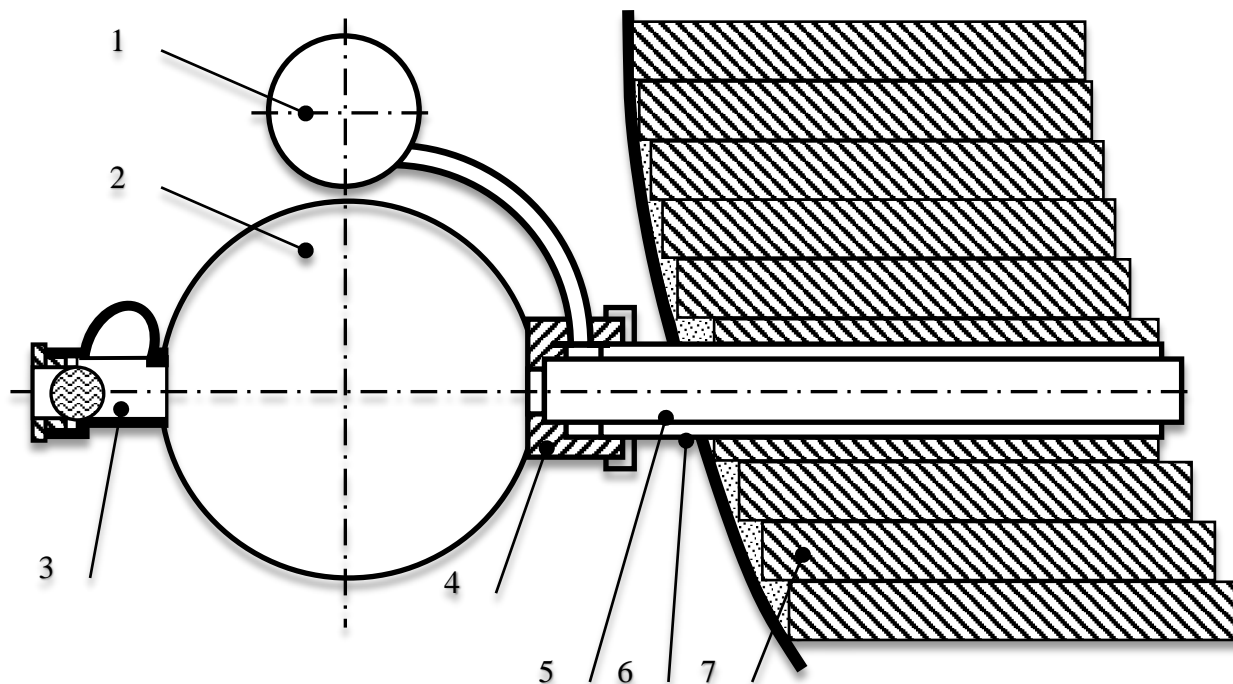


Рис.11. Конструкция фурмы в защитной оболочке:

1 – коллектор защитного газа (природный газ, азот, паро-водо-мазутная смесь, компрессорный воздух, конверторный воздух); 2 – коллектор воздушного дутья; 3 – воздушный клапан; 4 – распределительное устройство; 5- внутренняя фурма; 6- наружная фурма; 7 – футеровка фурменного пояса конвертора.

Установка подачи газа в защитную оболочку фурмы показана на рисунке 12. и состоит из конвертора, воздушного и защитного газа коллекторов, систем регулирования и подачи дутья в конвертор.

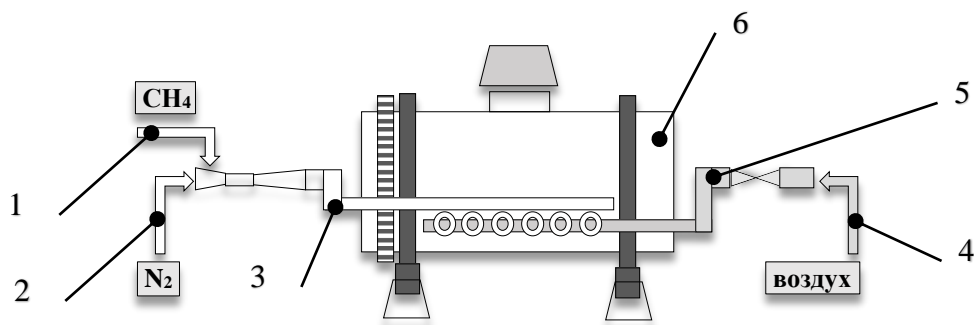


Рис.12. Установка подачи газа в защитную оболочку ФЗО:

1 – подача природного газа; 2- подача азота; 3 – коллектор защитного газа;
4 – подача конверторного воздуха; 5 – воздушный коллектор;
6 – конвертор.

Работает фурма следующим образом: конверторный воздух под давлением 90 - 130 кПа подается в основной воздушный коллектор и через распределительное устройство по внутренней трубе вдувается в расплав конвертора; защитный газ поступает по газовому коллектору и через распределительное устройство вдувается в зазор между внутренней стенкой наружной трубы и внешней стенкой внутренней трубы; на выходе из щели защитный газ обволакивает воздушный факел, не давая ему вступать в реакцию с расплавом непосредственно возле фурменного пояса, тем самым защищая футеровку от воздействия высоких температур.

3.3. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ

Сравнивая ФЗО с обычной конструкцией фурмы-коллектора (рисунок б), мы можем увидеть, что в устройство внесли минимально возможные изменения, что позволило учесть все ограничения на применение вновь разработанного устройства.

Разработанная конструкция принципиально отличается и от фурм, используемых за рубежом для донного дутья (рисунок 8.) [73], запатентованными Paul E. Queneau, Reinhardt, Guy Savard и Robert Lee, применяющих кислородсодержащую смесь при высоких (выше 0,5МПа) давлениях.

Существенное отличие предложенной конструкции наблюдается и по сравнению с фурмой, предложенной для плавки медно-никелевых руд (рисунок 13) [85].

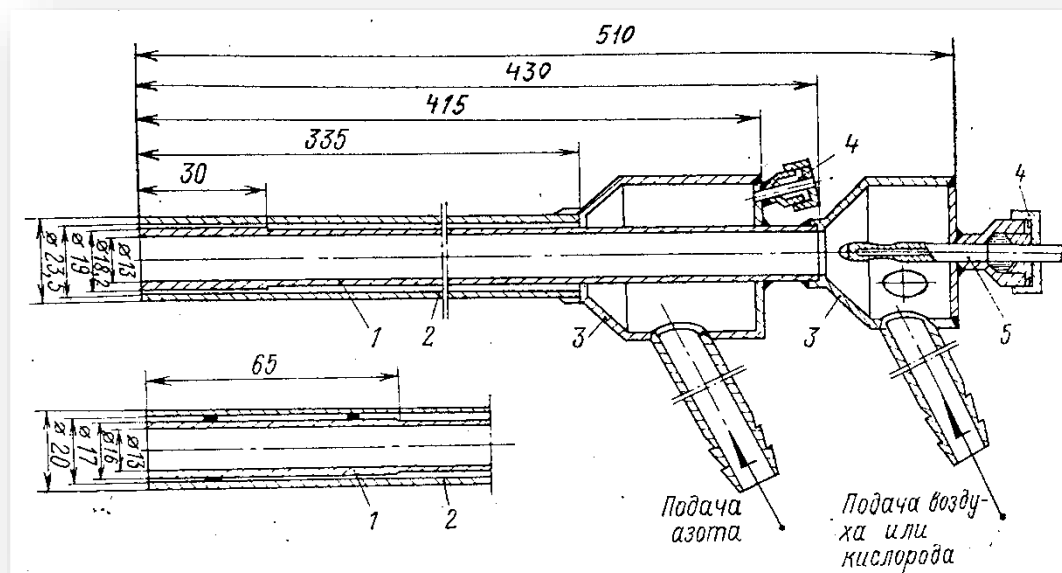


Рис.13 Конструкция ФЗО для плавки медно-никелевых руд [85]

Главное отличие заключается в том, что для обслуживающего персонала конвертора новая фурма не принесла каких-либо дополнительных трудностей в ее использовании: ремонте и эксплуатации. Все технологические операции и приемы ведения процесса остались неизменными.

Методика расчета и разработанная на ее основании конструкция фурмы, позволила решать задачи защиты фурменного пояса при использовании существующих параметров конверторного дутья, без применения воздуха высокого давления, без роста затрат на его производство. Сохранение основных узлов фурменного прибора делает фурму простой в эксплуатации и ремонте, и безопасной в обслуживании. Предложенная конструкция обеспечивает минимальные затраты на ее внедрение и освоение в технологическом процессе.

ВЫВОДЫ

1. По предложенной модели выполнен расчет технологических показателей и показана соответствующая им конструкция фурмы, предназначенная для конвертирования никелевых штейнов для 30-ти тонного конвертора.

2. С учетом разработанной конструкции, выполнена и смонтирована установка подачи защитной среды в фурменный прибор для последующего вдувания ее в расплав конвертора. Система управления позволяла регулировать количество подаваемого защитного газа и расход конверторного воздуха с пульта управления конвертора.

3. С учетом различной глубины фурменной канавки огнеупорного кирпича, были выполнены, изготовлены и смонтированы два варианта конструкции.

Показатели	I вариант, расчет	II вариант, расчет
Внутренний диаметр воздушной фурмы, мм	32	40
Наружный диаметр воздушной фурмы, мм	36	48
Внутренний диаметр азотной фурмы, мм	40	52
Наружный диаметр азотной фурмы, мм	48	60
Ширина щели, мм	2	2
Расход воздуха на фурму*, м ³ /ч	1049	1639
Расход азота на фурму*, м ³ /ч	304	400

* при $C_1 = 1,0$

Минимальное необходимое давление воздуха на фурмоколлекторе должно составлять – 0,11 МПа, давление азота 0,3 МПа. Данные параметры обеспечивают скорость истечения воздуха 253 м/с. Пример данного расчета выполнен для коэффициента C_1 равным единице. Для условий действующего производства расчет может быть уточнен по фактическим замерам показателей работы оборудования.

4. Опыт практического внедрения данной конструкции на действующем предприятии подтвердил все теоретические предпосылки, положенные в основу новой методики расчета.

ГЛАВА 4

ВНЕДРЕНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ КОНСТРУКЦИИ ФЗО

Для переработки никелевых штейнов автором была предложена фурма в защитной оболочке (рисунок 11) для внедрения на конверторном участке комбината "Южуралникель". Фурма была изготовлена силами ремонтных служб плавильного цеха и установлена первоначально на одном конверторе, а после получения положительных результатов внедрена на всех 13 конверторах цеха. В ходе промышленных испытаний были изучены вопросы влияния ФЗО на кампанию конверторов [12, 13, 98], на их производительность и качественные показатели, влияния различных защитных сред на работу никелевого конвертора [99].

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

4.1. ВЛИЯНИЕ ФЗО НА КАМПАНИЮ КОНВЕРТОРА

При внедрении предложенной конструкции на предприятии были учтены следующие моменты:

- отсутствие в достаточных количествах воздуха высокого давления;
- ограничения в использовании природного газа из-за недостаточного количества, поставляемого в цех.

Кроме этого, определенные трудности при практическом использовании фурмы накладывались недостатком попутно вырабатываемого на кислородной станции азота, активно используемого на других металлургических агрегатах действующего производства.

В период внедрения данной конструкции подачи воздушной смеси в конвертор проводились исследования по влиянию ФЗО на кампанию конвертора в сравнении с аналогичными конверторами, не оборудованными ФЗО. Схема установки

ФЗО на конверторе представлена на рисунке 12 и состоит из конвертора с бандажами и зубчатым венцом на опорных катках с системой подачи воздуха во внутреннюю трубу фурмы и азота, или природного газа или их смеси в кольцевой зазор фурмы. Отходящие газы удаляются из горловины через газонеплотный напыльник. С целью недопущения заматывания кольцевого зазора в момент подачи воздуха в расплав, подача защитной среды в наружную фурму осуществлялась на 2-3 сек раньше.

В процессе испытаний снимались все показатели, связанные с процессом конвертирования: количество перерабатываемых штейна, холодных присадок, отходов; количество и давление дутья воздуха и защитной среды, количество и температуру отходящих газов; температуру ванны расплава, температуру шлака, штейна и переливаемых масс; проводился полный хронометраж работы конвертора; проводился периодический отбор проб и анализ всех перерабатываемых материалов, полупродуктов и готовой продукции; периодически проводился анализ отходящих газов. После каждого перелива масс проводился замер толщины фурменного пояса через фурменные трубки и визуальный контроль состояния футеровки фурменного пояса через горловину конвертора. Контроль за работой проводился как конверторов, оборудованных ФЗО, так и конверторов сравнения без защитной оболочки.

В ходе внедрения ФЗО на комбинате "Южуралникель" было испытано несколько вариантов фурм с различным диаметром, который лимитировался размерами фурменного канала в огнеупорном кирпиче.

Опыт работы с фурмами различного диаметра показал, что существенно снижается производительность конвертора при работе с ФЗО с внутренним диаметром 32 мм. Обслуживание (прочистка) таких фурм вызывала дополнительные затруднения у конверторщиков, в связи с необходимостью использования более тонких фурмовок, которые сильно изгибались при их применении. Недостаток воздушного дутья приводил к существенному снижению объема переработки холодных присадок, холодному ходу конвертора с характерными в подобных случаях образовани-

ями настывшей на концах фурм (фото 4). Периодически необходимо было разматывать конвертор свежими порциями штейна. В связи с тем, что на предприятии отсутствовала возможность поднять давление конверторного воздуха, чтобы сохранить объем подаваемого в расплав кислорода, в дальнейшем использовалась ФЗО только с внутренним диаметром воздушной фурмы 40 мм. В этом случае конвертор имел ровный ход, фурмы, практически, не зарастали и не требовали прочистки. Футеровка изнашивалась равномерно по мере выгорания без образования ям и вывалов.

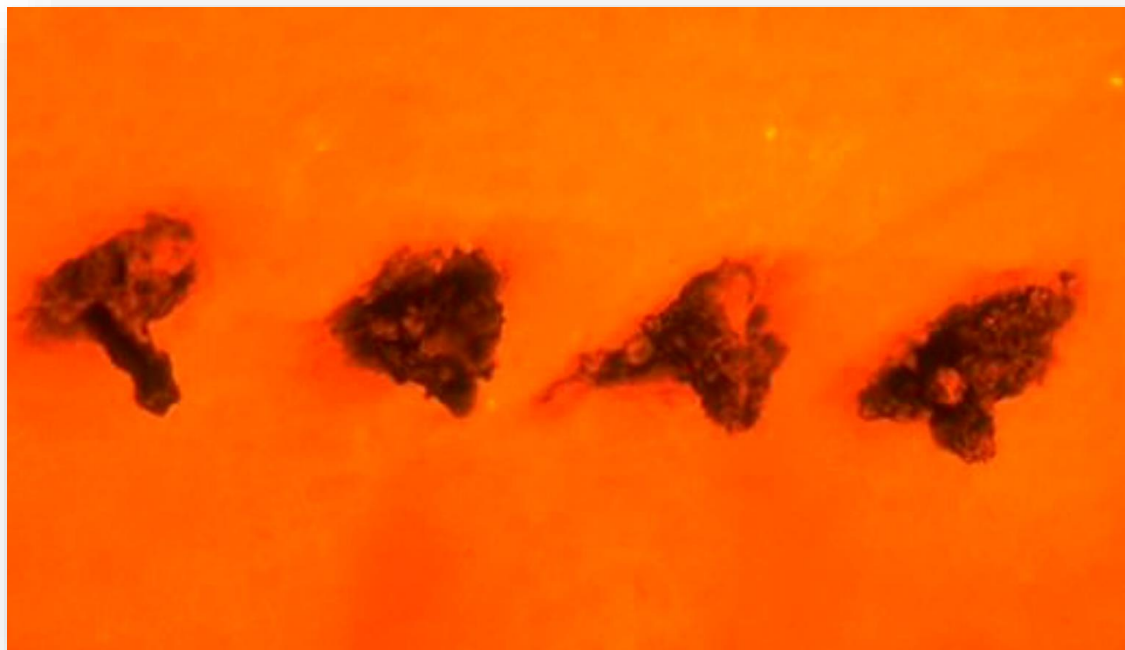


Фото 4. Наросты на фурмах конвертора [73]

В ходе испытаний был выявлен эффект первоначального сниженного расхода защитной среды, что, возможно, было связано перекрытием щелевого зазора, стекающим с футеровки расплава в момент останова конвертора. С целью устранения этого явления подачу защитной среды не перекрывали полностью в период кратковременных остановов и отключали только через 10-15 сек после перелива масс, или поворачивали конвертор так, чтобы избежать попадание расплава на фурмы при прекращении дутья.

Сводные характеристики двух вариантов ФЗО для 30-ти тонного конвертора представлены в таблице 10.

Таблица 10

Технологические показатели конверторов с ФЗО

Показатели	До модернизации	Расчет, С _{1-1,0}	Факт, С _{1-0,8}
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 ³ /ч	900-1300*	1639	1100-1400*
Расход азота на фурму, м ³ /ч		400	300-360*

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

Некоторые результаты испытаний, связанные с кампанией конверторов, работающих с ФЗО в защитной среде из азота представлены в таблице 11. Кампания конверторов набора, увеличилась с 5-8 суток до 16-34 суток. Пример рекордной работы (34 суток) конвертора №1 в наборе был вызван тем, что на нем в этот период не перерабатывались металлические отходы. Конвертор был остановлен из-за вывала кирпича в районе 2х фурм при обработке горловины ковшом. Состояние фурменного пояса в момент останова визуально оценивалось как 80% от первоначального. Последующий ремонт футеровки подтвердил эту оценку.

В целом по всему конверторному участку за период внедрения и последующей эксплуатации всех конверторов, оборудованных ФЗО, кампания конвертора набора увеличилась в 2 раза.

Кампания конверторов набора и варки автоклавной массы увеличилась с 13-15 суток до 22-39 суток и достигла стабильного и устойчивого увеличения в 1,5-1,7 раза по сравнению с конверторами без ФЗО. Меньшее увеличение продолжительности работы этих конверторов было вызвано тем, что они уже имели большую кампанию работы, достигающую 13-15 суток. Это связано с тем, что на этих конверторах перерабатывали меньше кобальтсодержащих отходов и работали на массе

конверторов обеднения с минимальным содержанием металлического железа. Разрушение фурменного пояса на них было вызвано, в основном, химическим и механическим разрушением футеровки в районе фурм, что приводило к потере ее прочности и вывалу кирпича при обработке горловины ковшом.

Таблица 11

**Показатели работы конверторов с азотом и без
в период внедрения ФЗО в период 1988-1989гг**

Кон-р №	Кампания, сут.	Расход в-ха, тыс.нм ³ /ч	Расход азота, тыс.нм ³ /ч	Причина останова
Конвертора набора				
12	16	16	3,5	прогар подины
12	18	16-18	2-3,8	конвертор перевернулся
8	18	16-20	3-4,0	прогар фурм
4	17	14-16	2,5-4,5	прогар фурм
8	15	16-20	3,5-4,0	прогар фурм
9	16	16-18	3,5-3,8	прогар фурм
4	12	14-16	3,5	прогар подины
12	7	15	без азота	прогар фурм
12	5	18	без азота	прогар фурм
12	8	15	без азота	прогар фурм
11	6	16	без азота	прогар фурм
1	34	16-19	4-4,5	прогар 2 х фурм
Конвертора варки автоклавной массы				
12*	22	12-18	3-4,1	потеря фурм
12	32	15-20	3,5-4,2	выпадение кирпича
12	33	19-20	2-3,5	выпадение кирпича
12	39	15-16	2-4,2	выпадение кирпича
12	26	15	3,6	останов цеха
1	35	16	4,2	потеря фурм
12	23	17	3,6	прогар горловины
1	38	15	3,6	прогар фурм
12	31	15	3,8	выпадение кирпича
12	13	15	без азота	прогар фурм
3	15	16	без азота	прогар фурм
Конвертора обеднения				
7	74	15	3,5	прогар фурм
7	51	14	без азота	прогар фурм

* первоначальная конструкция ФЗО с внутренним диаметром фурмы 32 мм.

Кампания конверторов обеднения при работе на азоте возросла в 1,4-1,5 раза до 70-90 суток, основная причина их останова была вызвана выгоранием фурм в огнеупорном кирпиче из-за систематического переполнения конверторов расплавами при нарушении работы главного пролета по вывозу отвального шлака из цеха. В данном случае факел концентрировался в области фурмы и тепловому воздействию подвергалась сама фурменная трубка, футеровка оставалась целой.

Проблема конверторов обеднения была решена при работе с ФЗО, где в качестве защитного газа использовали природный газ. Разложение газа в момент поступления в расплав обеспечивало температуру на срезе фурменной трубки не выше 500⁰С. Кампания конвертора №7 при работе на природном газе длилась более 105 суток.

В рассматриваемый период были проведены испытания с использованием в качестве защитной среды паровоздушной смеси и компрессорного воздуха. В первом случае пришлось отказаться от такой фурмы в связи с трудностями эксплуатации установки в зимний период из-за периодического замерзания конденсата в воздухопроводах, системах управления и регулирования.

Использование компрессорного воздуха хоть и дало положительный эффект, но не нашло практического применения из-за его ограниченного количества и недостаточности для работы основного металлургического оборудования. Кроме того, в данном случае наблюдался очень горячий ход конвертора, который было трудно регулировать из-за ограниченного количества холодных присадок и отсутствия сырьевых материалов, пригодных для переработки в конверторе.

4.2. ВЛИЯНИЕ ФЗО НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ КОНВЕРТОРА

Производительность конверторов, работающих с ФЗО и без нее была оценена по операциям набора. Исследовалась работа по переработке ковшей штейна, холодных присадок и отходов в одинаковые периоды сравнения в 1987-1988 гг. Это позволяет упростить анализ в связи с подобными содержаниями металлов и их весом в перерабатываемых штейнах, отходах и холодных присадках. Сопоставление

было проведено по количеству переработанных ковшей отнесенное на одну смену. Результат этого сравнения показан на рисунках ниже.

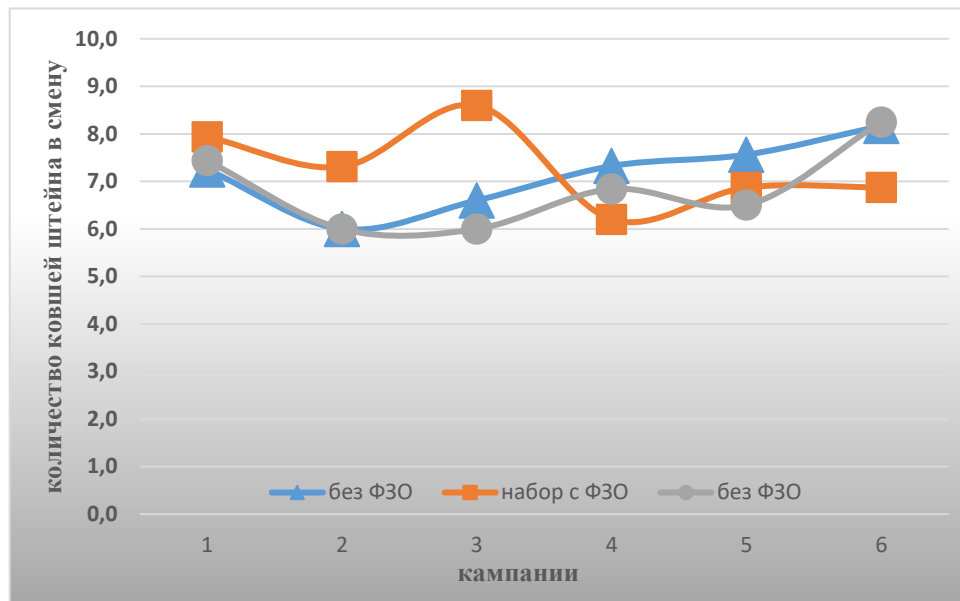


Рис.14. Количество переработанных ковшей штейна в смену

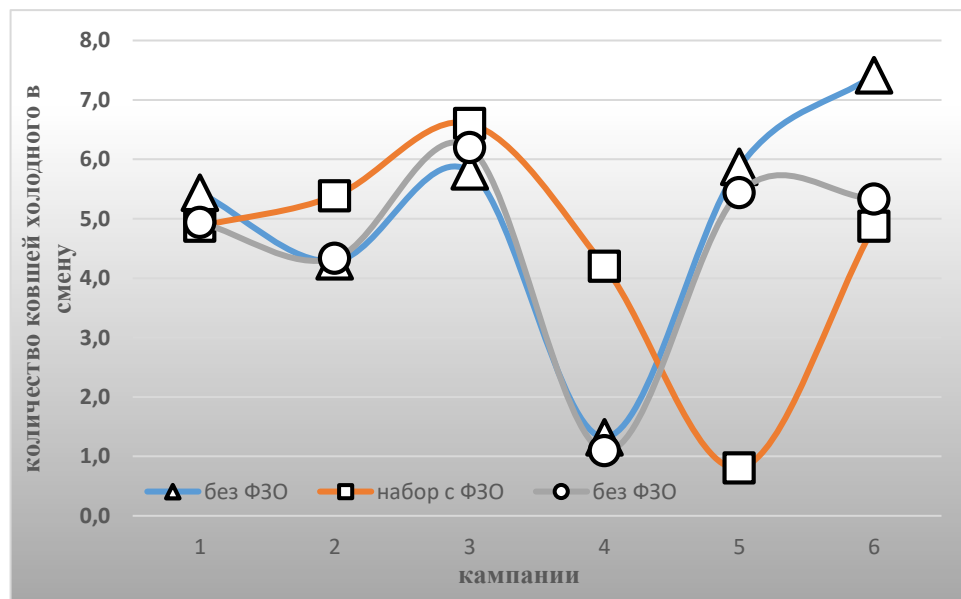


Рис.15. Количество переработанных ковшей холодного в смену

Представленные данные позволяют сделать вывод, что существенных отличий в количестве перерабатываемых материалов не наблюдалось. Снижение переработки холодных присадок и отходов в период 4 кампании было вызвано организационными причинами в плавильном цехе комбината "Южуралникель".

Средняя переработка ковшей штейна за смену в течении шести кампаний длительностью от 5 до 16 суток (рисунок 15) демонстрирует, что производительность конверторов, оборудованных ФЗО может как превышать показатели конверторов без ФЗО, так и быть ниже. Усредненные показатели по переработке штейна по всем кампаниям для первой группы конверторов набора без ФЗО равны 7,15 ковша за смену; для конверторов второй группы – 6,84 ковшей/смену. Конвертора с ФЗО перерабатывали 7,3 ковша за смену.

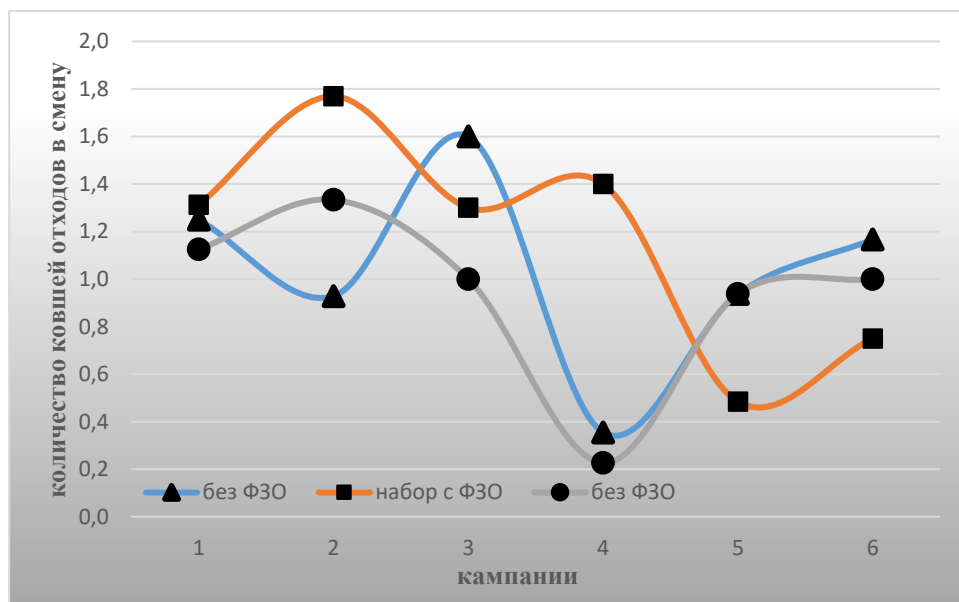


Рис.16. Количество переработанных ковшей отходов в смену

Противоположная ситуация сложилась с переработкой холодных присадок. Конвертора набора без ФЗО перерабатывали 5,02 и 4,56 ковшей холодного за смену; конвертора с ФЗО снизили объем переработки до 4,46 ковшей/смену.

Для металлизированных никельсодержащих отходов эти показатели составили: конвертора набора без ФЗО 1,04 и 0,94 ковшей за смену; конвертора с ФЗО – 1,17 ковшей отходов за смену (рисунок 16).

В целом за период наблюдений 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%.

Данное обстоятельство можно отнести к действию защитного газа, позволяющего увеличить переработку высокометаллизированного штейна и отходов, наиболее негативно влияющих на кампанию конвертора, за счет более спокойной ванны конвертора и снижения агрессивного воздействия на фурменный пояс. Аналогично – уменьшение перегрева массы, снижало потребность в переработке холодных присадок, которые перераспределялись на конвертора набора без ФЗО.

Это незначительное различие можно объяснить и другим обстоятельством. В период начала освоения конверторов с ФЗО на этом оборудовании работали конверторщики с более высокой квалификацией, что давало возможность вести технологический процесс конвертирования с большей производительностью по всем параметрам. По мере освоения процесса такого влияния уже не наблюдалось.

По результатам внедрения ФЗО на действующем производстве было отмечено, что оборудование конверторов фурмами в защитной оболочке, по крайней мере, не снижает их производительность по переработке штейна и холодных присадок и дает небольшой прирост переработки металлизированных никельсодержащих отходов.

После оборудования в 1988 году всех конверторов фурмами в защитной оболочке, исследования по сравнению показателей переработки штейна, отходов и холодных присадок были прекращены.

Подобный эффект влияния на производительность конвертора на комбинате "Южуралникель" был отмечен при работе конверторов набора на дутье обедненном по содержанию кислорода [32]. Добавка азота в фурмоколлектор в первоначальный период операции набора снижала содержание кислорода в воздухе, что приводило к снижению скорости реакций окисления и более холодному ходу конвертора. Соответственно, перерабатывая металлизированные штейны можно было уменьшать негативное воздействие дутья на фурменный пояс, регулируя степень обогащения его кислородом.

Сравнивая результаты работы конверторов набора с ФЗО за период 1987-1988 гг и их работой с регулируемой степенью обогащения в период 1985-1987гг,

отметим, что при подаче азота в защитную оболочку производительность конвертора не изменилась, а во втором случае – уменьшилась как по отношению к стандартным конверторам, так и к конверторам с ФЗО. При этом выборка была сделана по сопоставимым периодам в обеспечения конверторного участка холодными присадками (рисунок 17).

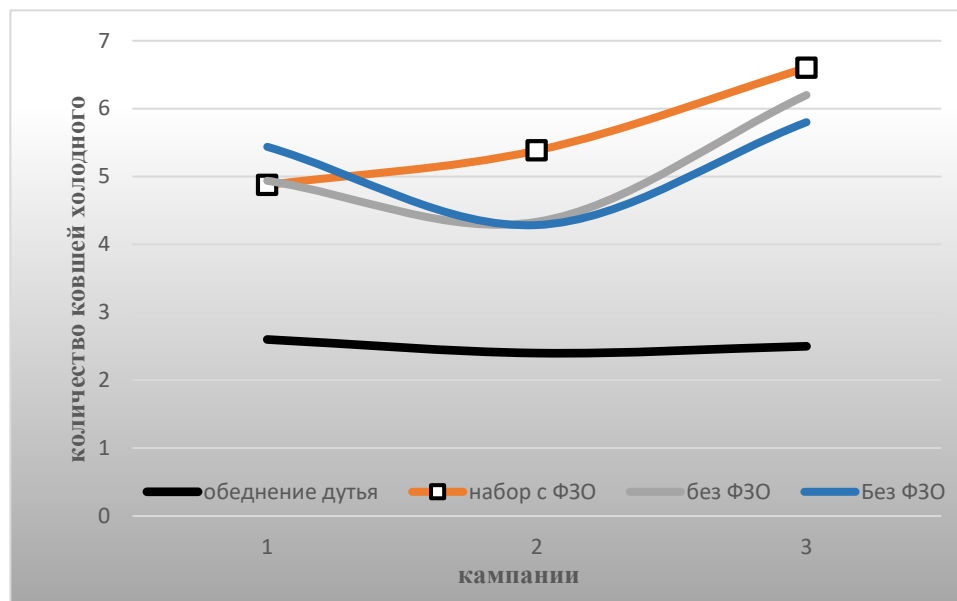


Рис.17. Количество переработанных ковшей холодного в смену

4.3. ВЛИЯНИЕ ЗАЩИТНОЙ СРЕДЫ НА ПРОЦЕССЫ ОБЕДНЕНИЯ КОНВЕРТОРНЫХ ШЛАКОВ

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.

Снижение потерь металлов со шлаками развивается по следующим направлениям: снижение удельной массы шлака; уменьшение его вязкости и поверхностного натяжения; увеличение жидкотекучести; восстановление или сульфидирование оксидов металлов в конверторе [100-106]; создание условий для улучшения разделения шлаковой и штейновой фазы; уменьшением объемов шлакообразования и др. способами. Это достигается, в основном, корректируемым и регулируемым составом шлака, направленным на уменьшение интервала плавления, снижением содержания магнетита, восстановлением окислов металлов, обработкой шлакового расплава твердыми, жидкими или газообразными восстановителями, увеличением времени отстоя и специальными технологическими приемами при сливе шлака с поверхности металла.

Переработка шлака вне конвертора развивается по двум направлениям: восстановительная сульфидирующая плавка в печах (конверторах обеднения, шахтных, электрических, пламенных, индукционных, обжиговых, фьюминг печах и т.д.); гидromеталлургическая переработка, включающая выщелачивание и флотацию [52, 101, 103, 105, 115-117].

На комбинате "Южуралникель" в основе обеднения конверторных шлаков лежит способ перемешивания жидких фаз за счет обратимых реакций (13-16).

В соответствии с законом действующих масс в условиях равновесия эти реакции можно представить через константу термодинамическую равновесия

$K_{Me/Fe}$ ⁹.

$$K_{Me/Fe} = \frac{N_{(Me)} \cdot \gamma_{(Me)} \cdot N_{[Fe]} \cdot \gamma_{[Fe]}}{N_{(Fe)} \cdot \gamma_{(Fe)} \cdot N_{[Me]} \cdot \gamma_{[Me]}} \quad (51)$$

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;

⁹ Константа приведена в форме обратной величины с целью последующего сопоставления с условной константой равновесия, представленной в большинстве источников по рассматриваемому вопросу [108].

$\gamma_{(Me)}$ – 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 молярной теплоемкости и энтальпии используем уравнения Киргофа:

$$\Delta C_p = \Delta a + \Delta bT + \Delta cT^2 + \Delta c'T^{-2} \quad (52)$$

$$\Delta H_p^T = \Delta H^0 + \Delta a(T - 298) + \frac{\Delta b}{2}(T^2 - 298^2) + \frac{\Delta c}{3}(T^3 - 298^3) + \Delta c'(\frac{1}{298} - \frac{1}{T}) \quad (53)$$

Изменение энергии Гиббса можно вычислить по методу, предложенному М.И. Темкиным и Л.А. Шварцманом использовавших уравнение:

$$\Delta G_T^0 = \Delta H_{298}^0 + T\Delta S_{298}^0 - T(\Delta aM_0 + \Delta bM_1 + \Delta cM_2 + \Delta bc'M_{-2}) \quad (54)$$

Результат расчета по основным обменным реакциям процесса обеднения методом перемешивания фаз для стандартных условий и температуре реакции 1300 К представлен в таблице 12. Исходные данные для расчета показателей использованы из источников [118-120].

Таблица 12.

Термодинамические расчеты основных реакций обеднения

№	Формула	$\frac{\Delta H_{298}^0}{\text{кДж}}$	$\frac{\Delta S_{298}^0}{\text{Дж}}$	$\frac{\Delta C_{298}^0}{\text{Дж}}$	$\frac{\Delta G_{298}^0}{\text{кДж}}$	$\frac{\Delta G_{1300}^0}{\text{кДж}}$	$K_{Me/Fe}$	$K_{Me/Fe}$
		моль	моль	моль К	моль	моль	Т 298К	Т 1300К
14	$NiO + Fe \leftrightarrow FeO + Ni$	-24,73	23,39	6,71	-31,70	-59,13	$0,3 \cdot 10^{-5}$	0,00421
13	$CoO + Fe \leftrightarrow FeO + Co$	-25,52	8,62	-5,5	-28,09	-35,97	$1,2 \cdot 10^{-5}$	0,03588
16	$NiO + FeS \leftrightarrow FeO + NiS$	-17,57	13,35	2,18	-21,56	-22,86	$16,7 \cdot 10^{-5}$	0,12063
55	$9NiO + 7FeS \leftrightarrow 7FeO + 3Ni_3S_2 + SO_2$	114,06	296,56	-48,44	25,62	-176,18	30820,8	$0,1 \cdot 10^{-6}$
15	$CoO + FeS \leftrightarrow FeO + CoS$	-44,77	7,07	-8,15	-46,88	-35,00	$0,01 \cdot 10^{-6}$	0,03924

Для рассматриваемых реакций изменение энергии Гиббса и термодинамических констант равновесия в зависимости от температуры реакции показано на рисунке 18. На основании теоретических расчетов можно сделать вывод, что наибольшее изменение значений констант равновесия в зависимости от температуры наблюдается для реакций сульфидирования оксидов никеля и кобальта.

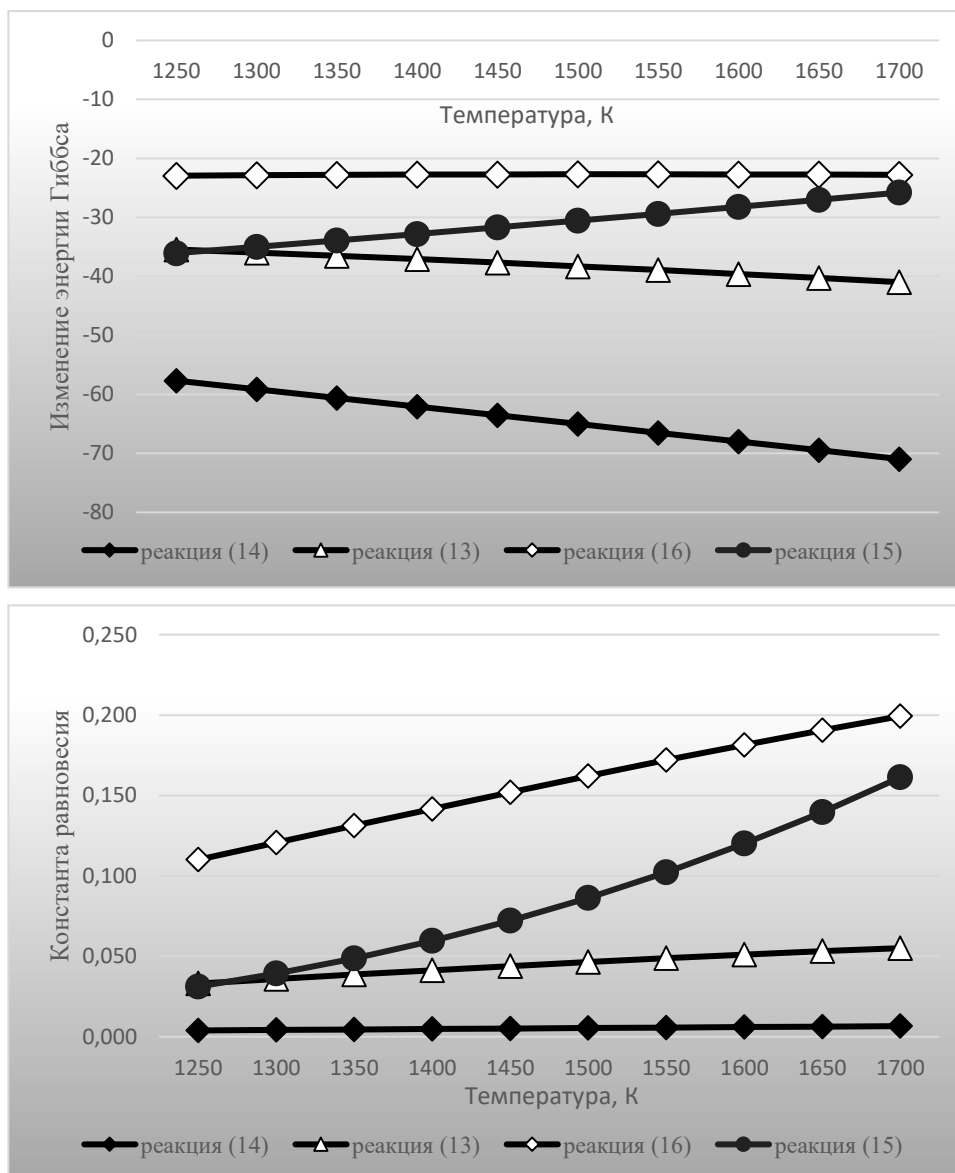


Рис.18. Изменение энергии Гиббса и термодинамические константы равновесия в зависимости от температуры по реакциям:
 14 - $NiO + Fe \leftrightarrow FeO + Ni$; 13 - $CoO + Fe \leftrightarrow FeO + Co$;
 16 - $NiO + FeS \leftrightarrow FeO + NiS$; 15 - $CoO + FeS \leftrightarrow FeO + CoS$

Для рассматриваемых условий по содержанию железа, никеля и кобальта в штейнах и шлаках и температур реакций термодинамическая константа равновесия практически совпадает с условной константой равновесия общеупотребительной в литературных источниках и практических расчетах [108]. Поэтому далее, для наглядности и сопоставимости данных из различных источников, мы будем учиты-

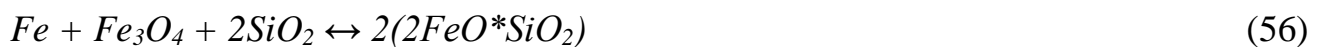
вать константу равновесия, основанную не на активностях, а на содержаниях металлов. В соответствии с работами А.А. Цейдлера, И.Ф. Худякова, В.И. Смирнова и др. константа равновесия для никеля условно постоянная величина, мало зависящая от концентраций металлов и для реакции (14) лежит в интервале от $0,49 \cdot 10^{-2}$ - $0,84 \cdot 10^{-2}$. Реакции восстановления и сульфидирования цветных металлов идут с выделением тепла, поэтому при росте температуры их константы равновесия увеличиваются так, при температуре 1250°C константа равновесия для реакции (55) растет с $0,389 \cdot 10^{-2}$ до $0,63 \cdot 10^{-2}$ при 1600°C . Для реакции (13) константа равновесия для указанного интервала температур увеличивается с 0,033 до 0,051.

Наиболее существенный рост констант наблюдается для реакций (15, 16) сульфидирования оксидов. При этом рост температуры играет двоякую роль. С одной стороны, увеличиваются растворимые потери окислов металлов, с другой стороны уменьшаются механические потери металлов за счет снижения вязкости шлака и улучшения коалесценции частиц металлов, способствующей разделению шлака и сульфидного расплава. Данное влияние наиболее выражено для меди, доля механических потерь которой в никелевом шлаке превышает 70 % и наименьшее для кобальта доля механических потерь которого не превышает 10%. Резник И.Д. акцентируя внимание на различной растворимости сульфидов металлов в шлаке, отмечает, что если сульфиды никеля и кобальта мало растворимы и распределение этих металлов определяется обменными реакциями, то растворимость сульфида меди и его механические потери оказывают решающее влияние на потери металла [108].

Теоретические исследования Л.Л. Чермака, подтвержденные практическими наблюдениями за процессом обеднения конверторных шлаков на комбинате "Южуралникель", показали несколько иную закономерность поведения кобальта в шлаке при перемешивании фаз [109]. Константа равновесия реакции сульфидирования кобальта шлака железом штейна является переменной величиной, меняющейся в зависимости от состава штейна в десятки раз в пределах 0,023 до 0,536. Большое влияние на константу равновесия оказывает содержание серы в штейне. Чем оно ниже (т.е. выше металлизация штейна), тем меньшее значение константы

равновесия. Никель, практически не оказывает влияния на распределение кобальта, в то время как при замещении никеля в штейне медью константа равновесия увеличивается.

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 (56).



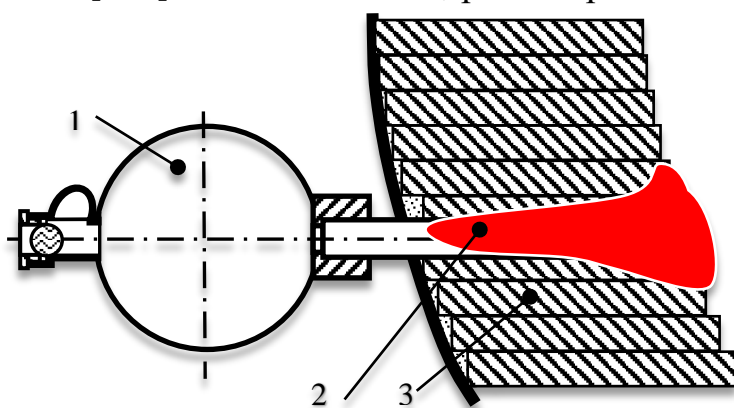
Переход цветных металлов из шлака в штейн состоит из трех стадий: передвижение ионов никеля, кобальта и меди к границе раздела шлака и штейна; преодоление этой границы; распространение металлов в штейне. Первая стадия является наиболее медленной, определяющей скорость процесса [121]. Для кобальта условный коэффициент диффузии в шлаке составляет порядка 10^{-4} см²/сек, а в штейне 10^{-3} см²/сек, что приводит к градиенту концентраций на границе фаз, 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.

Соответственно, наиболее благоприятные условия для обеднения жидких конверторных шлаков создаются при использовании метода перемешивания жидких фаз (рисунок 4), что позволяет получать отвальный шлак в процессе переработки штейна. У данного процесса имеется ряд недостатков, а именно; задействование дополнительного количества конверторов для обеднения сопоставимое с количеством конверторов набора; дополнительная нагрузка на крановое хозяйство,

связанная с большим количеством переливов расплавленных масс; окисление железа штейна при продувке расплава для перемешивания, что снижает эффективность операции.

У конверторов обеднения наблюдается довольно низкая кампания из-за выгорания фурменных трубок в огнеупорной футеровке (рисунок 18). Аналогичное явление с разгоревшимися фурменными гнездами на днище конвертора и выгорание сопел фурмы наблюдается в черной металлургии при конверторном получении стали [121]. В связи с этим, рассматривая вопросы, направленные на сохранение



восстановительной способности штейнов, одновременно необходимо учитывать пути повышения стойкости фурменного пояса [110, 111].

Рис.18. Фурма конвертора обеднения

- 1 – фурмоколлектор; 2 – прогар в футеровке фурменного пояса;
3 – огнеупорная футеровка.

Оборудование конверторов обеднения фурмами в защитной оболочке из азота привело к увеличению длительности их кампании в 1,4-1,5 раза, но не решило проблему полностью. При переполнении конвертора шлаком и, соответственно, повышенного гидростатического давления расплава на уровне среза фурм при неизменном давлении дутья создавались условия к смещению высокотемпературного фокуса непосредственно к фурмам и их выгоранию, образуя в огнеупорном кирпиче "норы", приводящие к прогару кожуха конвертора и его останову (рис.18).

С целью сохранения фурменной трубы на комбинате были проведены расчеты и исследования ФЗО, а в последующем промышленные испытания на конверторе обеднения №7, где в качестве защитной среды использовался природный газ. Кроме увеличения стойкости фурм предполагалось получение дополнительного эффекта, заключающегося в восстановлении продуктами конверсии природного

газа оксидных соединений железа, увеличивая металлизацию сульфидного штейна и восстановление окислов никеля и кобальта, уменьшая их потери со шлаком.

В ходе промышленных испытаний контролировались параметры: количество перерабатываемых шлака и штейна; количество переливаемой массы; анализ всех материалов на никель, кобальт, медь, железо (включая магнетит в шлаке), оксид кремния в шлаке; температура футеровки в области фурм; расход воздуха и природного газа; толщина фурменного пояса; проводился визуальный контроль состояния футеровки; учитывалась длительность продувки массы и общее время работы конвертора.

При анализе работы конвертора обеднения с природным газом, учитывались показатели работы конверторов обеднения, работающие на азоте. В таблице 13 показаны основные расчетные и фактические технологические параметры ФЗО для конверторов обеднения с азотом и природным газом.

Таблица 13

Значения ФЗО для азота и природного газа

Показатели	ФЗО с N ₂ (расчет)	ФЗО с CH ₄ (расчет)	ФЗО с CH ₄ (факт)
Уровень расплава от среза фурмы, мм	1000	1000	600-1300
Внутренний D воздушной фурмы, мм	40	40	40
Наружный D воздушной фурмы, мм	48	48	48
Внутренний D азотной фурмы, мм	52	52	52
Наружный D азотной фурмы, мм	60	60	60
Ширина щели, мм	2	2	2
Расход воздуха на фурму, м ³ /ч	1400	1540	1200-1600
Расход защитного газа на фурму, м ³ /ч	230	190	110-200
Давление газа в защитной оболочке, МПа	0,22	0,13	0,11-0,15
Давление воздуха в коллекторе, МПа	0,1	0,1	0,1
Скорость на срезе фурмы, м/с	183	205	190-250

Изменения уровня расплава в конверторе с 600 до 1300 мм, приводит к колебаниям параметров дутья и защитной среды в указанных пределах.

После обработки результатов испытаний отмечено, что кампания конвертора обеднения с ФЗО из природного газа превысила 105 суток в то время как конвертор сравнения отработал 71 сутки. Замер толщины футеровки показал, что огнеупор

изнашивался равномерно и менее интенсивно в сравнении с конвертором, оборудованным ФЗО с азотом в качестве защитной среды (рисунок 19). Если работу исследуемого конвертора сравнить с конвертором, не оборудованным ФЗО, то выявленный эффект становится еще выше, т.к. стандартный срок работы такого конвертора составлял 40-50 суток.

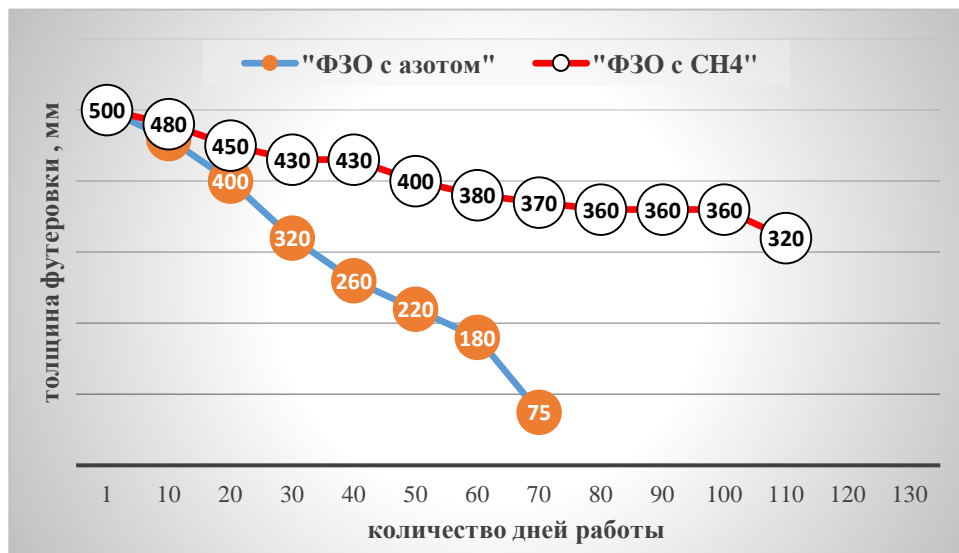


Рис.19. Изменение толщины футеровки фурменного пояса конверторов обеднения с ФЗО из азота и CH_4

По причинам организационного характера данный эксперимент не был доведен до полного износа футеровки фурменного пояса, но исходя из состояния огнеупора по сопоставлению с конвертором сравнения его кампания могла бы быть продлена еще на 30-40 суток. Главное отличие в работе конверторов обеднения заключалось в полном отсутствии появления "нор" на фурменном поясе где были установлены ФЗО с природным газом.

Вторым моментом, наблюдаемым в ходе промышленных испытаний, было влияние природного газа, используемого в качестве защитной среды на эффективность процессов обеднения конверторного шлака [128]. Типовой состав конверторного шлака с конверторов набора в период испытаний, представлен на рисунке 20.

Отметим, что шлаки первых сливов могут содержать значительное количество цветных металлов в связи с переработкой металлизированных отходов в

начале процесса конвертирования и смывом с футеровки конвертора части массы предыдущего периода.

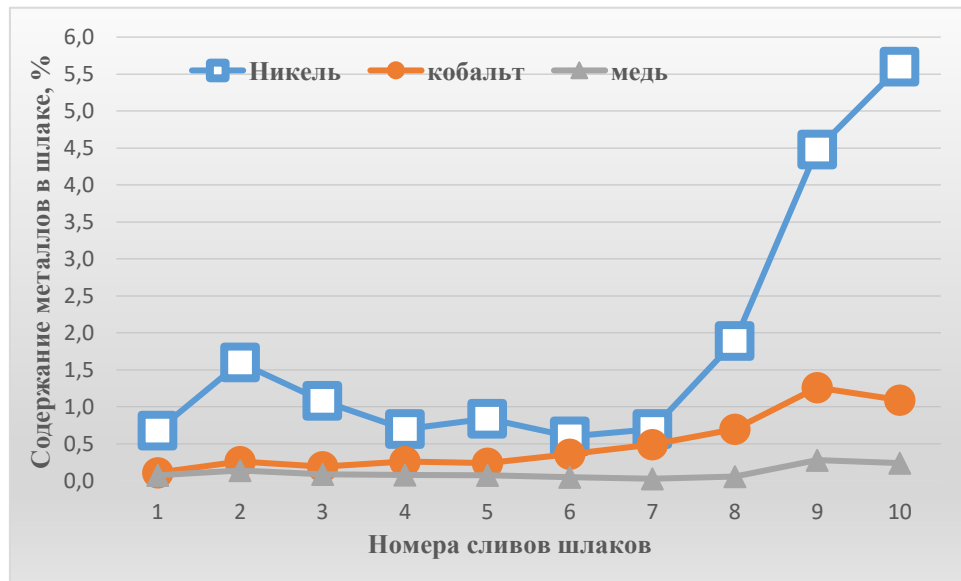


Рис.20. Изменение содержания цветных металлов в шлаке

В дальнейшем рост содержания никеля в шлаке до 4-6 % и кобальта до 1-2% вызван работой конверторов набора на стадии подгонки массы перед началом процесса варки файнштейна и рафинированием ее от кобальта.

По ходу переработки новых порций шлака содержание никеля и кобальта в массе мало отличалось между конверторами при использовании азота или природного газа (рисунки 21 и 22). В тоже время, по содержанию металлов в шлаках отличия были значимы (рисунки 23 и 24). Наибольшее влияние на переход металла из шлака в массу при продувке природным газом наблюдалось для кобальта.

Для конвертора, работающего с азотом, обедняемый шлак становился оборотным после пятого обрабатываемого ковша, при этом содержание кобальта в массе составляло 1,3%, содержание в шлаке - 0,05%. Для ФЗО с CH_4 только после обработки восьмого ковша шлак становился оборотным, при этом содержание кобальта в массе превышало 2,4% (рисунок 23). Для никеля эффект природного газа несколько ослаблен, шлак становился оборотным после обработки седьмого ковша (рисунок 24).

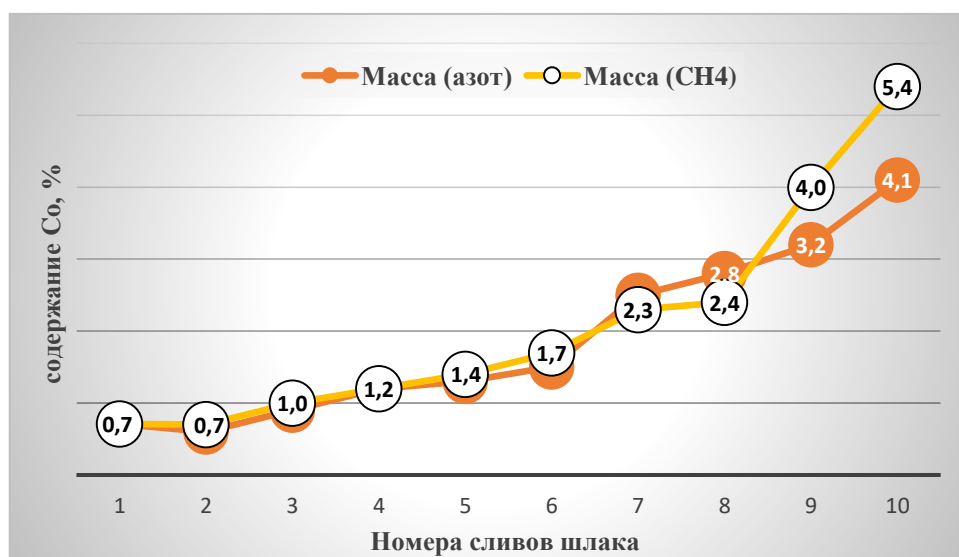


Рис.21. Динамика обогащения массы кобальтом по мере обработки ФЗО с азотом и CH_4

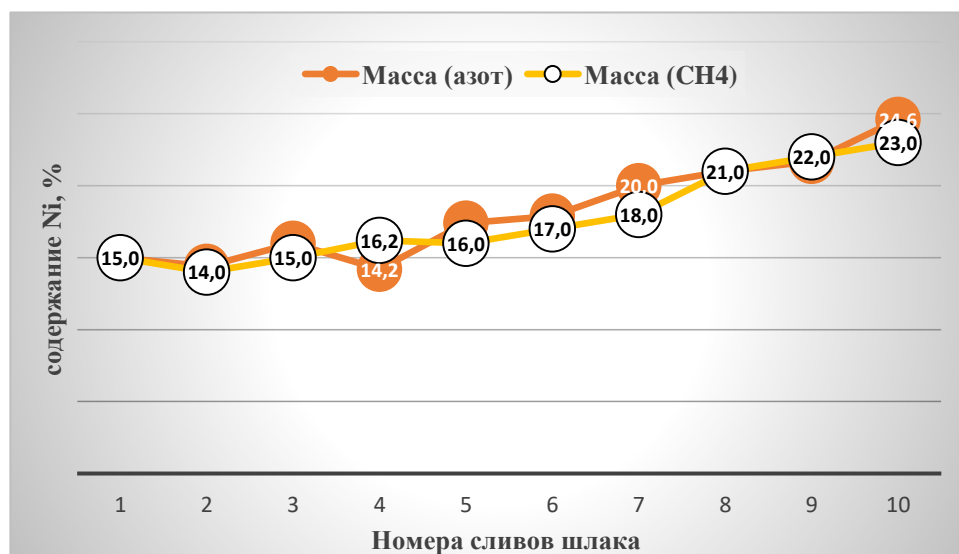


Рис.22. Динамика обогащения массы никелем по мере обработки ФЗО с азотом и CH_4

Для поведения меди в шлаках в ходе данных испытаний какой-либо зависимости от состава защитного газа выявлено не было. На содержание меди в шлаке влияло только ее содержание в массе, содержание сульфида железа в извлекаемой фазе, содержание магнетита и оксида кремния в шлаке, температура массы и время отстоя после перемешивания.



Рис.23. Кобальт в шлаке после обеднения с азотом и CH_4

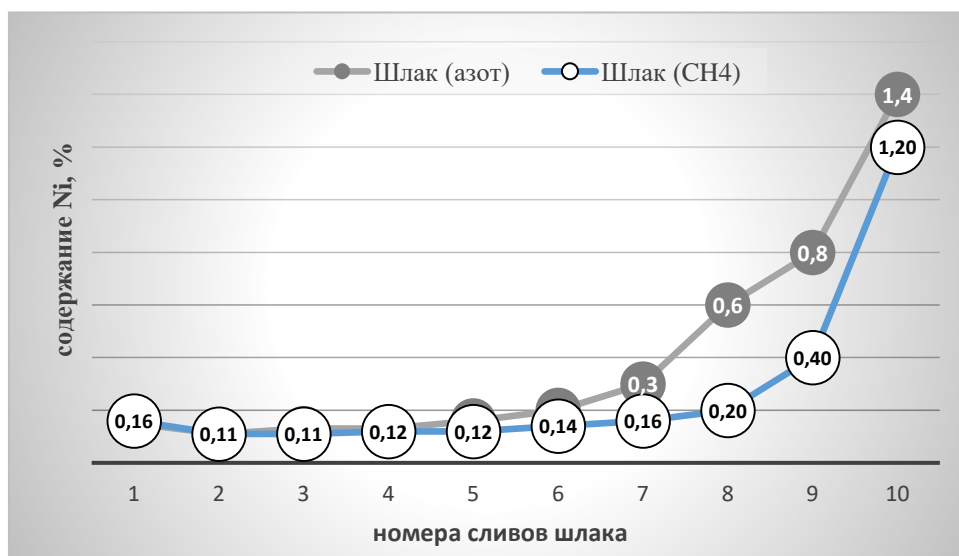


Рис.24. Никель в шлаке после обеднения с азотом и CH_4

Анализ результатов экспериментов позволяет утверждать, что влияние природного газа на обеднение конверторных шлаков основано на реакции (57) разложения CH_4 и окисления продуктов разложения (58-60), восстановления оксидов железа, никеля и кобальта шлака по реакциям (61-62).



Эти реакции взаимосвязаны и имеют различные вероятности осуществления в условиях обеднения конверторных шлаков методом перемешивания фаз.

В ходе исследований было отмечено, что содержание железа в шлаке при перемешивании фаз, практически не изменялось, что позволяет предположить об уменьшении условной константы равновесия для кобальта по реакции (13) в связи с уменьшением его содержания в шлаке при контакте с более богатыми массами. Изменение условной константы по мере обработки новых порций шлака для кобальта представлено на рисунке 25.

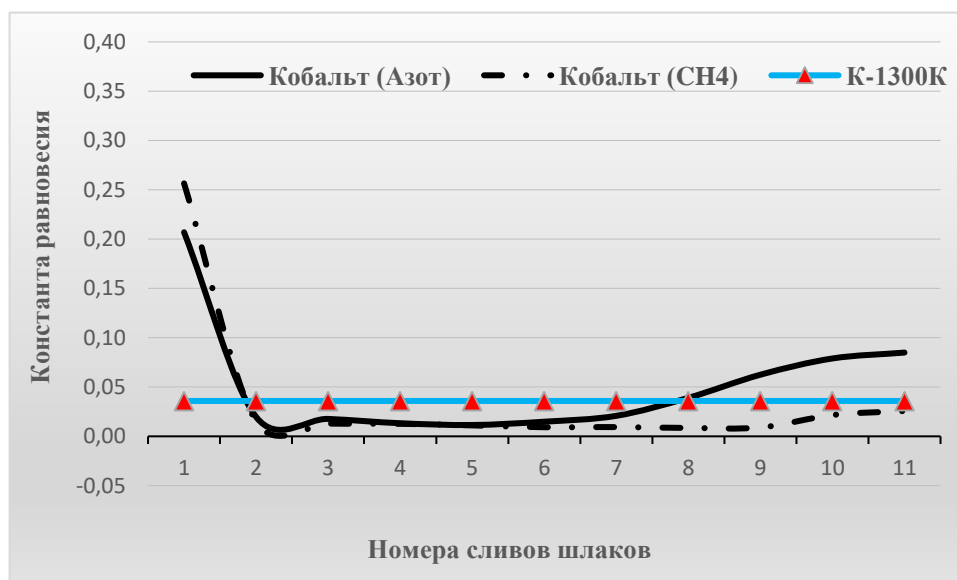


Рис.25. Условная константа равновесия реакции (13) для кобальта с ФЗО для азота и CH_4 и термодинамическая константа реакции для Т-1300 К

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 (рисунок 25).

Высокие первоначальные константы равновесия вызваны дополнительными механическими и растворимыми потерями металлов в начале каждой операции переработки штейна в конверторах набора и разматыванием футеровки конверторов обеднения от остатков массы предыдущих операций.

Для никеля условная константа равновесия для природного газа уменьшается незначительно (рисунок 26). Наибольшее различие наблюдали на завершающих стадиях технологической операции, при обработке последних ковшей шлака.

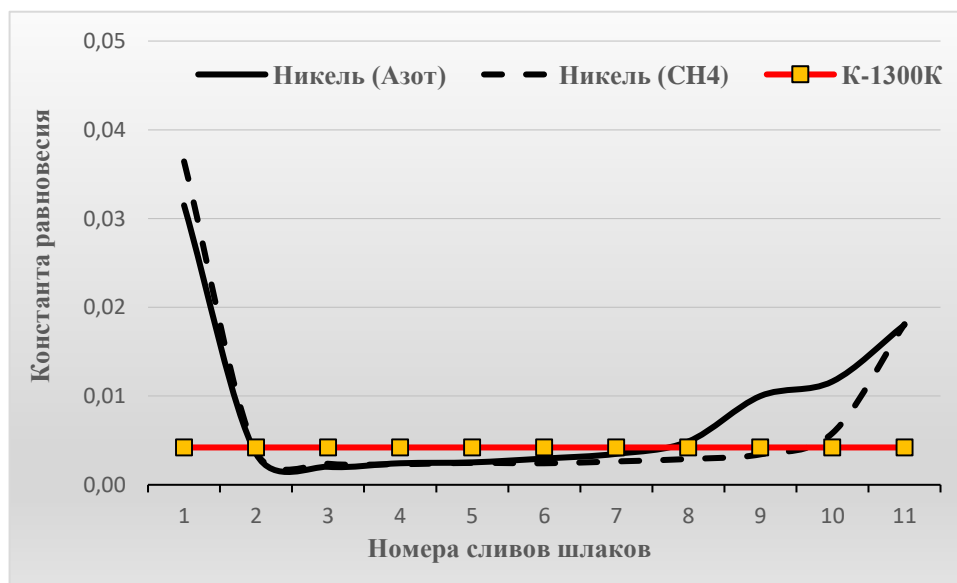


Рис.26. Условная константа равновесия реакции (14) для никеля с ФЗО для азота и CH_4 и термодинамическая константа реакции для Т-1300 К

При этом термодинамическая константа равновесия для Т-1300 К практически совпадает с условной для содержаний никеля в шлаках ниже 1%. Для защитной среды с использованием природного газа значения константы имеют более низкое

значение чем для ФЗО с азотом, что особенно заметно для последних обрабатываемых ковшей со шлаком. Выявленная зависимость константы равновесия для никеля, так же, как и для кобальта может быть подтверждена динамикой изменения содержания железа в массе (рисунок 27).

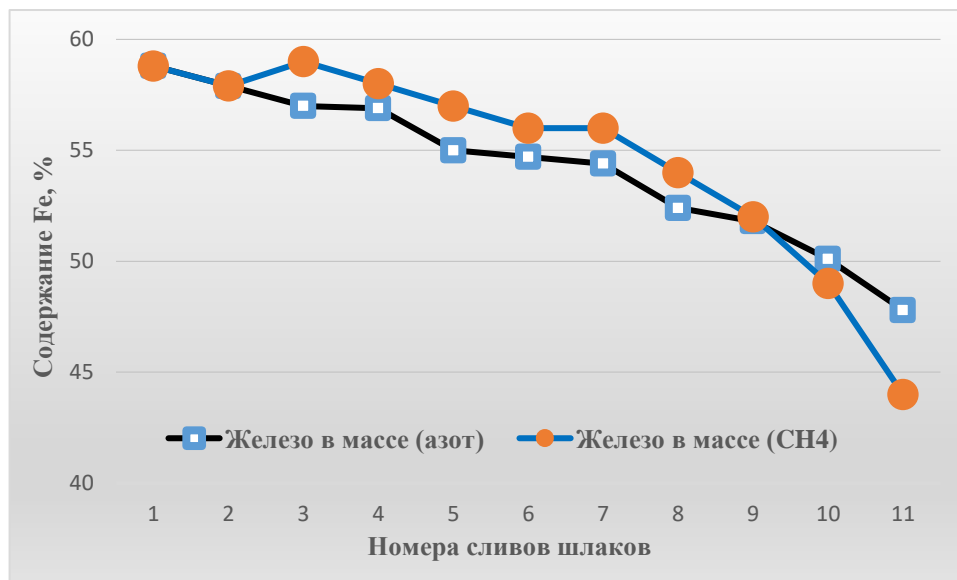


Рис.27. Динамика изменения содержания железа в массе конверторов обеднения

Практически на всех стадиях обработки шлака, ФЗО с газом обеспечивает более высокое содержание железа в массе. Изменение этой зависимости по последнему сливу шлака вызвано стремлением конверторщиков получить более богатую массу, путем увеличения времени продувки и размытия настывшей ферроникеля, образующейся на подине конвертора в большем количестве при работе с газом в качестве защитной среды чем с азотом.

Повышенное образование ферроникеля на подине конвертора обеднения с газом в качестве защитной среды можно объяснить и результатом прямого восстановления окислов никеля и кобальта по реакциям (61, 62) продуктами конверсии природного газа.

Для меди в шлаках изменения условной константы равновесия при обеднении шлаков методом перемешивания фаз в ходе проведенных экспериментов зафиксированы не были.

Результаты испытаний ФЗО с защитной средой в виде природного газа на конверторах по обеднению конверторного шлака методом перемешивания жидких фаз позволили зафиксировать два технологических эффекта:

- первый - увеличение кампании конвертора обеднения с 40-50 суток на обычном дутье до 105 суток при использовании ФЗО с CH_4 за счет более ровного износа огнеупорной футеровки и снижения вероятности выгорания фурм с образованием "нор" в огнеупоре при разложении природного газа у среза фурмы, идущем с поглощением тепла;

- второй – уменьшение свободного кислорода в дутье и горение продуктов конверсии природного газа, снижает парциальное давление кислорода в расплаве, уменьшает степень окисления металлического и сульфидного железа штейна, повышая, тем самым эффективность операции обеднения методом перемешивания фаз.

Дополнительный эффект по обеднению шлаков в рассматриваемых условиях был отмечен только для кобальта и для никеля. Снижение содержания меди в никелевых шлаках не было зафиксировано в связи с ее низким содержанием и иным механизмом распределения меди между массой и шлаком. Высокая доля (более 90%) содержания растворенной сульфидной меди и ее механических потерь делают эффективным извлечение меди из шлаков только хорошим перемешиванием, последующим отстоем, снижением вязкости шлака и увеличением температуры.

4.4. МЕХАНИЗМ ЗАЩИТНОГО ДЕЙСТВИЯ ФЗО

4.4.1. ФЗО с природным газом

С учетом научно-исследовательских работ Резника И.Д., Есина О.А., Гельда П.В., Смирнова В.И., Худякова И.Ф. Окунева А.И., Шмониной Ю.Б., Бабаджана А.А., Цейдлера А.А., Шалыгина Л.М. и полученные результаты проведенных промышленных испытаний автором предложен механизм влияния природного газа на работу конвертора.

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. Расчет параметров ФЗО для рассматриваемых условий представлен в работе [12].

Для оценки глубины проникновения дутьевого факела в расплав используем методику Казанцева И.Г. [123], по которой для расчета критерия Архимеда применена формула (63)

$$Ar = \frac{\omega^2 * \rho}{g * \rho_m * d} \quad (63)$$

где, Ar – критерий Архимеда,

ω - скорость истечения дутья на срезе фурмы, м/с,

ρ - плотность газовой среды, кг/м³,

ρ_m - удельный вес массы расплава, кг/м³,

d - внутренний диаметр фурмы, м

Используя разработанную автором методику, получим для рассматриваемых условий скорость истечения газа на срезе фурм 205 м/с. В работах [12,13, 88] было отмечено, что при снижении скорости истечения защитного газа до уровня 100-150 м/с, эффект защитной оболочки исчезает. Поэтому, для нахождения глубины проникновения струи, по отношению к диаметру фурмы, принята минимальная скорость истечения 150 м/с. Результаты расчета для различного уровня заполнения шлаком конвертора представлены в таблице 14.

Таблица 14

Расчет глубины проникновения дутья в расплав для СН₄

Уровень расплава, см	Скорость смеси на срезе фурмы, м/с	Плотность газовой среды, кг/м ³	Удельный плотность расплава, кг/м ³	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 х диаметров от среза фурмы (табл.14), 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°C [61]. Это обстоятельство обеспечивает защиту фурмы от воздействия высокой температуры расплава, предотвращает выгорание фурменной трубки и образования "нор" в огнеупорной футеровке. Замеры температуры в области фурм с помощью предварительно заложенных термомпар на разном расстоянии от огневой поверхности и с помощью оптического пирометра в момент останова конвертора, показали, что температура фурмы не превышала 600°C . Цемехман Л.Ш. с соавторами отмечают, что температура на срезе фурмы при использовании в качестве защитной среды природного газа не превышает 400°C [124].

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 [108, 125, 126, 128]. Уменьшение доли кислорода, окисляющего металлическое и сульфидное железо, увеличивает содержание последнего в массе по сравнению с конверторами обеднения, работающими на ФЗО с азотом (рисунок 27).

4.4.2. 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 28) 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 высокотемпературную зону в этом районе и высокую циркуляцию расплава в противотоке с движением воздуха. Поток расплава в области 3 (рисунок 28) 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.

Вторая значимая область циркуляции расплава (область 2, рисунок 28) движется вдоль днища конвертора сверху вниз и омывает фурменную зону восходящим потоком снизу.

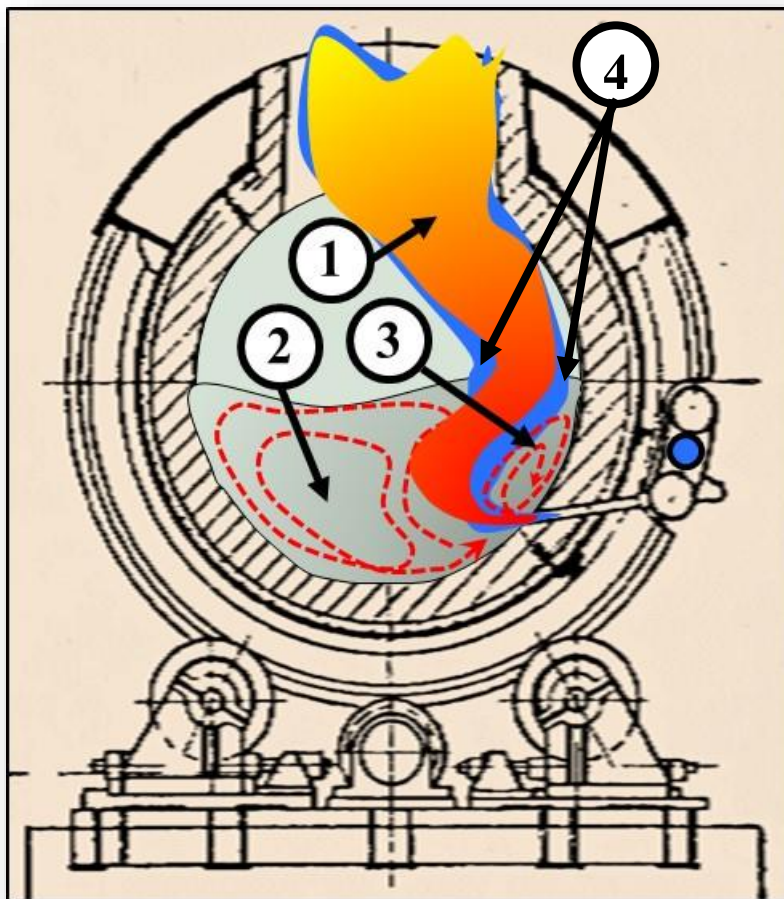


Рис.28 Механизм воздействия дутья на расплав

Данная область может иметь несколько дополнительных циркуляций, вызываемых и определяемых уровнем расплава, углом наклона фурм, положением конвертора, наличием в конверторе отходов и холодных присадок.

Таким образом, в районе фурмы встречаются

два противоположных потока расплава и дутьевой факел, создающий температуру в этой зоне на уровне 1200-1400⁰С. Механическое, тепловое и химическое воздействие агрессивного расплава существенно ограничивают срок службы огнеупора, не имеющего защитного гарнисажа.

При использовании ФЗО наблюдается явление, связанное с "заворачиванием" струи дутьевого воздуха в оболочку из нейтрального газа, предотвращающую взаимодействие кислорода дутья с расплавом на расстоянии 4-6 диаметров воздушной фурмы от стенки.

Данное расстояние зависит от скорости движения защитной оболочки и давления защитной среды на срезе фурмы. Чем выше скорость и давление, тем дальше факел "пробивает" ванну, не вступая во взаимодействие с расплавом. В соответствии с методикой Казанцева И.Г. глубина проникновения струи с азотом достигает 6 диаметров (таблица 15). В результате возникают несколько эффектов: смещение дутьевого факела вглубь ванны от фурменной стенки, увеличение объема области 3 (рис.28), снижение скорости циркуляции расплава вдоль стенки, успокоение ванны и удаление высокотемпературного фокуса от поверхности огнеупора, снижая тепловое воздействие на него.

Таблица 15

Расчет глубины проникновения дутья в расплав для азота

Уровень расплава, см	Скорость смеси на срезе фурмы, м/с	Плотность газовой среды, кг/м ³	Удельный плотность расплава, кг/м ³	Внутренний диаметр фурмы, м	Ar	X/d	Глубина проникновения в расплав, см
60	253	1,75	5000	0,04	43,4	6	24
100	205	1,86	5000	0,04	36,4	4	16

Кроме непосредственного ограничения воздействия кислорода дутья с расплавом на расстоянии до 24 см от футеровки, азот играет еще и дополнительную роль, заключающуюся в отводе тепла из зоны фурменного пояса, тем самым уменьшая зону высоких температур.

Наблюдения за механизмом воздействия азота на ход конвертора, позволили предположить, что даже за пределами защитного влияния на факел дутья (область 4, рис.28), 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 [77-78, 83, 95-96].

Для условий 30-ти тонного конвертора эффект ФЗО возникает при обеспечении скорости истечения воздуха и азота на уровне 220-250 м/с. При скоростях ниже 100-150 м/с – эффект ФЗО не наблюдался. 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 м³/мин, азота – 6,7 м³/мин. При использовании природного газа в качестве защитной среды его расход составит 3,2 м³/мин и давления 0,13 МПа.

4.5 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".

Опыт эксплуатации новой конструкции фурмы в защитной оболочке показал, что кампания работы конверторов: набора и варки фэйнштейна увеличилась с 5-8 суток до 16-34 суток, подготовки и варки автоклавной массы с 13-15 до 22-39 суток,

обеднения конверторного шлака с 50 до 70 суток. Использование в качестве защитной среды природного газа, кроме увеличения кампании конвертора до 105 суток, привело к повышению эффективности работы конверторов обеднения по извлечению никеля и кобальта в готовую продукцию.

Анализ режимов работы конверторов с ФЗО позволил предложить механизм защиты фурменного пояса воздействием защитной среды на дутьевой воздух и механизм действия природного газа на эффективность показателей обеднения.

Оценка экономической эффективности данного внедрения была выполнена только для варианта увеличения кампании конверторов, тк эффект от увеличения извлечения кобальта и никеля, а также снижения количества оборотных материалов затруднен из-за приостановки деятельности предприятия в настоящее время. Экономия огнеупоров в период испытаний и внедрения фурм в защитной оболочке подтверждена соответствующими документами того периода.

Расчет годового эффекта выполнен следующим образом:

исходные данные:

- расход хромомагнезитового кирпича на один текущий ремонт конвертера -15 тонн;
- количество ремонтов в год – 12 шт;
- среднее по году сокращение ремонтов при использовании на конверторах ФЗО в 3 раза;
- стоимость тонны ХПТ – 70 руб. в ценах 1989 г или 56 800 руб. в ценах 2017г [127];
- количество конверторов – 13 шт.

расчет:

- экономия кирпича от сокращения ремонтов в три раза на одном конвертере:

$(12-12:3) \times 15 = 120$ тонн.

- в расчете на 13 конвертеров:

$13 \times 120 = 1560$ тонн.

- в ценах 1989 г экономия на кирпиче составит $1560 \times 70 = 109\,200$ руб.

- в ценах 2017 г экономия на кирпиче составит $1560 \times 56800 = 88\,608\,000$ руб.

исключения:

- в расчетах не учтена з/п рабочих-огнеупорщиков в связи с тем, что они работают на повременной системе оплаты труда.

- в расчетах не учтено снижение коммерческих и транспортных расходов.

В результате внедрения на конвертерах ФЗО увеличена межремонтная кампания никелевого конвертора в три раза, что привело к экономии огнеупорного кирпича в объеме 1560 тонн в год и дало экономический эффект в ценах 1989 г в размере 109,2 тыс. руб или в ценах 2017г в сумме 88,608 млн. руб.

ВЫВОДЫ

1. Разработанная методика расчета фурмы в защитной оболочке позволила рассчитать технологические параметры устройства и выполнить конструкцию с последующей ее установкой на конвертерах. Фурма полностью соответствовала ограничениям действующего производства, что позволило успешно внедрить ее на существующем оборудовании.

2. Практическая реализация внедрения новой конструкции была осуществлена на комбинате "Южуралникель". Использование на никелевых конвертерах фурм в защитной оболочке из азота, разработанных и внедренных на предприятии, позволило увеличить кампании работы конверторов: набора и варки фанштейна с 5-8 суток до 16-34 суток, подготовки и варки автоклавной массы с 13-15 до 22-39 суток, обеднения конверторного шлака с 50 до 70 суток.

3. Рассматривая влияние защитной оболочки на производительность конверторов набора и варки фанштейна отмечено, что в целом за период наблюдений 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 конвертерах с ФЗО снизилась на 6,9%. Такой результат можно объяснить, как воздействием защитной среды путем уменьшения перегрева расплава и

более спокойного хода конвертора, так и за счет более высокой квалификации конверторщиков на конверторах, оборудованных ФЗО.

По результатам внедрения ФЗО на действующем производстве было отмечено, что оборудование конверторов фурмами в защитной оболочке, по крайней мере, не снижает их производительность по переработке штейна и холодных присадок и дает небольшой прирост переработки металлизированных никельсодержащих отходов.

4. Применение защитной среды из природного газа на конверторах обеднения помимо дополнительного увеличения кампании оборудования до 105 суток, позволило зафиксировать эффект по обеднению конверторных шлаков, заключающийся в удлинении периода обеднения с получением отвального шлака за счет поддержания в массе уровня содержания металлического и сульфидного железа.

5. Для пояснения этого явления предложен механизм взаимодействия защитной оболочки из природного газа и массы расплава, заключающийся в разложении газа с поглощением тепла и последующим восстановлением окислов железа продуктами разложения природного газа. Местное снижение парциального давления кислорода в раскрывающемся факеле дутья снижает переход цветных металлов в шлаковую фазу в наиболее активный и интенсивный период прохождения реакций окисления в непосредственной близости от фурменного пояса.

6. Рассматривая механизм воздействия на расплав защитной оболочки замечено наличие нескольких областей движения расплава. Отмечено, что в районе фурмы два противоположных потока расплава встречаются с дутьевой струей, создающей температуру в этой зоне на уровне 1200-1400⁰С. Механическое, тепловое и химическое воздействие агрессивного расплава существенно ограничивают срок службы огнеупора, не имеющего защитного гарнисажа.

Защитная оболочка обволакивает воздушную струю, предотвращая взаимодействие кислорода дутья с расплавом на расстоянии 3-6 диаметров от фурменной стенки. Данное расстояние зависит от скорости движения защитной оболочки и давления защитной среды на срезе фурмы. В случае использования природного газа зона реакции охлаждается за счет экзотермических реакций его разложения и

удаления тепла с продуктами реакции. При применении азота возникает аналогичный эффект по удалению тепла с газами и охлаждению фурменной области.

7. Наблюдения за механизмом воздействия ФЗО на производительность конвертора, позволили предположить, что в процессе продувки расплава смешения защитной оболочки из азота с воздухом дутья, практически не происходит. Азот не снижает парциальное давления кислорода и оказывает минимальное влияние на переработку материалов в конверторе.

8. В результате использования ФЗО возникают следующие эффекты: смещение дутьевого факела вглубь ванны от фурменной стенки, увеличение объема циркуляции расплава в фурменной области, успокоение ванны и удаление высокотемпературного фокуса от поверхности огнеупора, снижая тепловое воздействие на него.

9. Для обеспечения эффекта ФЗО необходимо обеспечение скорости истечения воздуха и азота на уровне 220-250 м/с, но не ниже 100-150 м/с, с этой целью целесообразно применять наружную трубу с наружным диаметром 60 мм и толщиной стенки 4 мм, внутреннюю трубу с наружным диаметром 48 мм и толщиной стенки 4 мм.

Экономический эффект рассчитанный только от экономии огнеупорного кирпича за счет увеличения кампании конверторов дает ежегодную экономию (в ценах 2017 г) 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, природного газа, компрессорного воздуха и паровоздушной смеси. 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 файнштейна 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 использовании 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 от увеличения кампании работы оборудования, составившего 88,608 млн. руб. в ценах 2017г.

При проведении исследований и разработке новой методики широко использовались исследования отечественных и зарубежных авторов в области современных способов защиты огнеупорной футеровки конверторов, разработки методов расчета конструкций фурменных приборов конвертора, исследований в области распределения цветных металлов между жидкими фазами при пирометаллургической переработке расплавов. Системный подход к анализу используемых методик расчета фурменных приборов конвертора, позволил разработать математическую модель ФЗО, разработанную на базе программного обеспечения Microsoft office Excel.

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.

В качестве перспективы дальнейшей разработки представленная методика расчета фурм в защитной оболочке **рекомендуется** для применения 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 рекомендуется использовать фурмы 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 автоматизации производственных процессов за счет совершенствования конструкции фурм с ФЗО и применения новых конструкционных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://www.ereport.ru/articles/commod/nickel.htm>
2. <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2018/mcs2018.pdf>
3. <https://www.crugroup.com/analysis/monitors/>
4. <https://www.crugroup.com/analysis/cost-services/>
5. <https://www.cobaltinstitute.org/statistics.html>
6. <https://www.lme.com/en-GB/Metals/Non-ferrous/Nickel#tabIndex=2>
7. <https://www.lme.com/Metals/Minor-metals/Cobalt#tabIndex=2>
8. Смирнов В.И., Цейдлер А.А., Худяков И.Ф., Тихонов А.И. *Металлургия меди, никеля и кобальта. Ч.2.* - М.: *Металлургия*. 1966.- С.406.
9. *Совершенствование техники и технологий металлургической переработки полиметаллического сырья. Сборник научных трудов – М.: ЦНИИцветмет экономики и информации.* 1982.- С.50-55
10. Захаров Б.Н., Воробьев В.А. *Шахтная плавка окисленных никелевых руд и конвертирование никелевых штейнов.* - М.: *Металлургия*. 1974. - С.165.
11. Пименов Л.И., Михайлов В.И. *Переработка окисленных никелевых руд.* - М.: *Металлургия*, 1972. - С. 336.
12. Король Ю.А., Набойченко С.С. *Расчет фурмы в защитной оболочке для конвертирования никелевых и медных штейнов, рекомендации по ее применению // Цветные металлы.* 2018. № 5. - С. 31-40.
13. Барсуков Н.М., Король Ю.А., Русаков М.Р., Гальнбек А.А., Пашковский А.А., Пронин А.Ф. *Переработка никелевых штейнов в горизонтальных конверторах с фурмами в защитной оболочке // Цветные металлы.* 1992. № 3. - С. 12-13.
14. Бабаджан А.А., Худяков И.Ф. *Конвертирование полиметаллических штейнов.* –М.: *ЦНИИЦМ*. 1962. - С.175.
15. Сагтарова А.С., Тихонова Т.А. *Огнеупоры для конверторов цветной металлургии.*-М.: *Металлургия*. 1988. - С.182.

16. Кудрина А.П., Гульев Г.Ф. Огнеупоры для кислородных конверторов. -М.: Металлургия.1966. - С.144.
17. Огнеупоры. Справочник: Пер. с япон. Серебрякова В.Я., Сеницыной А.Н. – М.: Металлургия. 1967. - С.191.
18. Огнеупоры и их применение: Пер. с япон. Инамуры Я. –М.: Металлургия. 1984. - С.448.
19. Кащеев И.Д., Стрелов К.К., Мамыкин П.С. Химическая технология огнеупоров.-М.:Интернет Инжиниринг. 2007. - С.752.
20. Савченко И.Т., Белецкий П.А. Кладка и ремонт металлургических печей. – М.:ОНТИ ДНТВУ НКТП. 1937. - С. 244.
21. Данилов Л.И., Ножненко А.В., Иванов П.Ф. Скоростные методы ремонтов в цветной металлургии. – М.: Металлургия. 1981. - С.72.
22. Joel P.T. Kapusta, Submerged gaz jet penetration: A study of bubbling versus jetting and side versus bottom blowing in copper bath smelting. JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society, 2017. - Vol.69. №.6.
23. A. D. Resende, Increasing refractory life in a pierce-smith converter through numerical simulations. Felipe Terra Elias Magnesita, Contagem, Brazil. 2014.
24. Шалыгин Л.М. О путях усовершенствования конверторного передела в никелевом производстве // Пути совершенствования производства никеля на базе внедрения новой техники и технологии. Материалы всесоюзного совещания. М.: ЦНИИИТЭИЦМ. 1965. - С.72-75.
25. Joel Kapusta, Nubia Cardona Valencia Energy Consumption in Copper Smelting: A new Asian Horse in the Race. JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society, may 2015.
26. 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.

27. Пат. 2487947 РФ. МПК С21В 7/10. Способ охлаждения узлов металлургических печей и устройство для его осуществления / Якорнов С.А., Булатов К.В., Скопин Д.Ю., Азнабаев Р.А., Сорокин С.В., Барсуков Н.М; патенто-обладатель ООО "Медногорский медносерный комбинат" (RU). №2011148191/02; заявл. 25.11.2011; опубл. 20.07.2013; Бюл. №20.
28. Живов М.З., Кормилицын С.П., Лебединская Н.А., Чемыхин В.И., Юшина Л.Н. Исследование условий тепловой работы футеровки кислородных конверторов никелевого завода // Пирометаллургические процессы и методы анализа в технологии никеля и кобальта. Сборник научных трудов. – Л.: Гипроникель. 1979. - С. 67-73.
29. Гальнбек А.А. Непрерывное конвертирование штейнов. – М.: Металлургия. 1993. - С.86.
30. Словиковский В.В., Фоминцева Т.А., Ерошкина В.И., Рожин Ю.И., Унжакова Р.А., Серенко Н.Ф. Усовершенствованная футеровка тепловых агрегатов, снижающая теплотери // Проблемы рационального использования топливно-энергетических ресурсов в цветной металлургии. Сборник трудов. – Свердловск: ВНИИЭНЕРГОЦВЕТМЕТ.1989. - С. 158-164.
31. Словиковский В.В., Рожин Ю.И., Гомоюнов Л.М., Унжакова Р.А. Разработка факельного торкретирования агрегатов цветной металлургии // Торкретирование и повышение стойкости футеровки металлургических агрегатов. Тезисы докладов 2 Всесоюзной конференции. – М.: ЦНИИИТЭИЧМ. 1988. - С. 73.
32. Гальнбек А.А., Барсуков Н.М., Русаков М.Р., Алексеева О.Ю., Пашковский А.А., Пронин А.Ф. Конвертирование никелевого штейна дутьем с пониженным содержанием кислорода // Цветные металлы. 1988. № 1. - С. 39-41.
33. Аветисян Х.К. Металлургия черновой меди – М.: Металлургиздат. 1954. - С.464.
34. Бабаджан А.А., Худяков И.Ф. Конвертирование полиметаллических штейнов. –М.: ЦНИИЦМ. 1962. - С.175.

35. Худяков И.Ф., Тихонов А.И., Деев В.И., Набойченко С.С. *Металлургия меди, никеля и кобальта. Т.2. Metallургия никеля и кобальта.* – М.: Metallургия. 1977. - С.263.
36. Шалыгин Л.М. *Конверторный передел в цветной металлургии* - М.: Metallургия, 1965. - С. 165.
37. Бровкин В.Г., Пиотровский В.К. *Переработка жидких конверторных шлаков* –М.: Metallургия. 1978. - С.104.
38. Уразов Г.Г., Черноморский М.Л. *Металлургия никеля.* – М.: Гостехиздат. 1931. - С. 228.
39. Брюквин В.А., Шехтер Л.Н., Звиададзе Г.Н., Блохина Л.И., Больших М.А. *Растворимость кислорода в расплавах сульфида никеля // Сульфидные расплавы тяжелых металлов.* –М.: Наука. 1982. - С.61-67.
40. Вольский А.Н., Сергиевская Е.М. *Теория металлургических процессов.* – М.: Metallургия. 1968. - С. 344.
41. Мечев В.В., Быстров В.П., Тарасов А.В. *Автогенные процессы в цветной металлургии.* – М.: Metallургия.1991. - С.413.
42. Штейнберг С.С. *Металловедение.* – Свердловск: Metallургиздат. 1961. - С. 598.
43. Набойченко С.С., Агеев Н.Г., Дорошкевич А.П., Жуков В.П. и др. *Процессы и аппараты цветной металлургии: учебник для вузов.* – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ.2005. - С.700.
44. Лакерник М.М., Севрюков Н.Н. *Металлургия цветных металлов.*-М.: Metallургиздат. 1957. - С.535.
45. Абдеев М.А. *Полиметаллические штейны и их конвертирование.* – Алма-Ата: АН Казахской ССР АГМИ. 1962. - С.228.
46. Брюквин В.А., Звиададзе Г.Н. *К вопросу механизма взаимодействия расплавок сульфида железа с кислородом // Сульфидные расплавы тяжелых металлов.* –М.: Наука. 1982. - С.46-58.
47. Лоскутов Ф.М. *Снижение потерь цветных металлов с отвальными шлаками.* – М.: Metallургиздат. 1943. - С.132.

48. Елисеев Е.И., Вольхин А.И., Михайлов Г.Г., Смирнов Б.Н. Расчеты металлургических процессов производства меди: учебное пособие. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. 2012. - С.221.
49. Грейвер Н.С. Получение никеля из сульфидных медно-никелевых руд Советского Союза. – М.: Металлургиздат. 1938. - С.128.
50. Смирнов В.И., Мишин В.Д., Коршунов Г.П. Труды Уральского индустриального института. Сб. науч. тр. №18. 1944. - С. 43-46.
51. Ванюков А.В., Зайцев В.Я. Шлаки и штейны цветной металлургии. – М.: Металлургия. 1969. - С. 408.
52. Смирнов В.И., Худяков И.Ф., Деев В.И. Извлечение кобальта из медных и медно-никелевых руд и концентратов. – М.: Металлургия. 1970. - С.256.
53. Чермак Л.Л. Обеднение конверторных шлаков. //Изв. вуз. Цветная металлургия. 1959. №6. - С. 94-100.
54. Шмонин Ю.Б. Пирометаллургическое обеднение шлаков цветной металлургии. – М.: Металлургия. 1981. - С. 132.
55. Хорошавин Л.Б. Шпинелидные наноогнеупоры. – Екатеринбург: УрО РАН. 2009. - С.600.
56. Огнеупоры и огнеупорные изделия. Ч.2. – М.: Издательство стандартов. 1988. - С. 152.
57. Горлов Ю.П., Еремин Н.Ф., Седунов Б.У. Огнеупорные и теплоизоляционные материалы. – М.: Стройиздат. 1976. - С. 192.
58. Морачевский А.Г., Рябко А.Г., Цемехман Л.Ш. Система железо-никель-сера. Фазовая диаграмма и термодинамические свойства. – Санкт-Петербург: Издательство политехнического университета. 2006. - С. 92.
59. Вайсбурд С.Е., Ремень Т.Ф., Новикова Н.Н. Термодинамическая активность железа в системе железо-никель-сера при 1300⁰ С //Журн. Физич. Химии.1969. Т.43., №12. - С. 3172-3174.

60. Гуревич Е.Я., Анджапаридзе А.С., Резник И.Д. О роли металлического железа в процессе конвертирования никелевых штейнов // Совершенствование техники и технологии металлургической переработки полиметаллического сырья. Сб. науч. трудов. – М.:Гинцветмет. 1982. - С. 50-55.
61. Арсентьев П.П., Квитко М.П. Конверторный процесс с донным дутьем. – М.: Металлургия, 1983. - С. 128.
62. Интернет ресурс: <https://metallurgy.zp.ua/osobennosti-raboty-konverterov-s-donnoj-produvkoj/>
63. Интернет ресурс: <http://mitalolom.ru/2012/04/15/rafinirovaniya-stali/>
64. Интернет ресурс: <http://helpiks.org/3-94360.html>
65. Интернет ресурс: <http://metallurgiya.net/metallurgiyastali/139-konverternye-processy-s-donnoj-produvkoj-10.kislorodom.html>.
66. Баптизманский В.И. Механизм и кинетика процессов в конверторной ванне. – М.:Металлургиздат. 1960. - С.284.
67. Интернет ресурс: <http://buymore.pro/article/metally-i-metalloprokat/475/konverternye-processy-donnoj-produvkoj-kislorodom/>
68. Интернет ресурс: <http://heattreatconsortium.com/metals-advisor/basic-oxygen-furnace/basic-oxygen-furnace-equipment/>
69. Кудрин В.А. Применение кислорода в сталеплавильном производстве. Сб. трудов Московского ин-та стали. – М.: Металлургиздат. 1957. - С. 214-232.
70. Бардин И.П., Афанасьев С.Г., Шумов М.М., Эпштейн З.Д. Применение кислорода в конверторном производстве стали. М.: Металлургиздат, 1959. - С.264.
71. Мозговой Н.И., Афанасьев С.Г., Шумов М.М. и др. Конвертирование высокофосфористых чугунов // Труды/ ЦНИИЧМ. М.: Металлургиздат, 1956, вып.16. - С.229-230.
72. Scheidig K., Kleinsschmidt R. Bottom-blown converter - Neue Hutte, 1973. V.3. - S. 170-174.

73. Joel Kapusta The Savard-Lee shrouded injector: a review of its adoption and adaptation from ferrous to... Conference Paper · December 2013, интернет ре-
сурс:
https://www.researchgate.net/publication/301292795_THE_SAVARD-LEE_SHROUDED_INJECTOR_A_REVIEW_OF_ITS_ADOP-TION_AND_ADAPTATION_FROM_FERROUS_TO_NON-FERROUS_PYROMETALLURGY?enrichId=rgreq-f8079dd9acb0e5aa7098bac5d59a502d-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzMwMTI5Mjc5NTtBUzoz-NTA4ODA2NDI2ODI4OD-FAMTQ2MDY2Nzg3Mjc5NA%3D%3D&el=1_x_2&_esc=publicationCover-Pdf
74. A.A. Bustos and J.P. Kapusta, “High Oxygen Shrouded Injection in Copper and Nickel Converters”, Proceedings of the Brimacombe Memorial Symposium, ed. G.A. Irons and A.W. Cramb (Montreal, QC: The Metallurgical Society of CIM, 2000), - P.107–124.
75. A.A. Bustos, M. Cardoen, and B. Janssens, “High Oxygen Enrichment at UM-Hoboken Converters”, Proceedings of the Copper 95 – Cobre 95 International Conference, Vol. IV – Pyrometallurgy of Copper, ed. W.J. Chen, C. Diaz, A. Luraschi, and P.J. Mackey (Montreal, QC: The Metallurgical Society of CIM, 1995), - P.255–269.
76. A.A. Bustos, J.P. Kapusta, B.R. Macnamara, and M.R. Coffin, “High Oxygen Shrouded Injection at Falconbridge”, Proceedings of the Copper 99 – Cobre 99 International Conference, Vol. VI – Smelting, Technology Development, Process Modeling and Fundamentals, ed. C. Diaz, C. Landolt and T. Utigard (Warrendale, PA: The Minerals, Metals and Materials Society of AIME, 1999), - P.93–107.
77. J.P. Kapusta, H. Stickling, and W. Tai, “High Oxygen Shrouded Injection at Falconbridge: Five Years of Operation”, Proceedings of Converter and Fire Refining Practices, ed. A. Ross, T. Warner, and K. Scholey (Warrendale, PA: The Minerals, Metals and Materials Society of AIME, 2005), - P.47–60

78. B. Salt and E. Cerilli, "Evolution of the Converter Aisle at Xstrata Nickel's Sudbury Smelter", Proceedings of the International Peirce-Smith Converting Centennial Symposium, ed. J.P.T. Kapusta and A.E.M. Warner (Warrendale, PA: The Minerals, Metals and Materials Society of AIME, 2009), - P.135–149.
79. B. Salt and E. Cerilli, "Converter Aisle Improvements at Xstrata Nickel's Sudbury Smelter", Proceedings of the Pyrometallurgy of Nickel and Cobalt Symposium, 48th Conference of Metallurgists, ed. J. Liu, J. Peacey, M. Barati, S. Kashani-Nejad, and B. Davis (Montreal, QC: The Metallurgical Society of CIM, 2009), - P.333–349.
80. Интернет ресурс: <http://www.copper2016.jp/program/html/session-04.html>
81. Kaixi Jiang, Lan Li, Yaping Feng, Haibei Wang, Bang Wei, "The Development of China's Primary Copper Smelting Technologies", Proceedings of the T.T. Chen Honorary Symposium on Hydrometallurgy, Electrometallurgy and Materials Characterization, ed. S. Wang, J.E. Dutrizac, M.L. Free, J.Y. Hwang, and D. Kim (Warrendale, PA: The Minerals, Metals and Materials Society of AIME, 2012), - P.167–176.
82. Baojun Zhao, Zhixiang Cui, Zhi Wang, "A New Copper Smelting Technology – Bottom Blown Oxygen Furnace Developed at Dongying Fangyuan Nonferrous Metals", Fourth International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing, ed. T. Jiang, J.Y. Hwang, P.J. Mackey, O. Yucel, and G. Zhou (Warrendale, PA: The Minerals, Metals and Materials Society of AIME, 2013), - P.3–10.
83. Joel Kapusta, Nubia Cardona Valencia Energy Consumption in Copper Smelting: A new Asian Horse in the Race. JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society, may 2015
84. Цемехман Л.Ш., Ежов Е.И., Певзнер М.И. и др. Автогенная плавка сульфидных медно-никелевых руд с применением погруженного в расплав кислородного дутья. – Сб. "Пирометаллургические процессы в технологии никеля и кобальта", вып.№8. (72). Л.: Гипроникель.1978. - С. 21-24.

85. Недвецкий Е.П., Хомченков Б.М., Арефьев К.М., Цемехман Л.Ш. Некоторые закономерности работы кислородных фурм с защитной азотной оболочкой. – Сб. "Новые направления в пирометаллургии никеля", вып.№8. (72). Л.: Гипроникель.1980. - С. 49-56.
88. Гальнбек А.А., Барсуков Н.М., Русаков М.Р., Ежов Е.И., Недвецкий Е.П. Особенности продувки жидкости фурмой с защитной оболочкой (ФЗО) – науч.тр.//Автогенные и автоклавные процессы в медно-никелевом производстве. Л.: Гипроникель. 1987. - С. 57-62.
89. Баптизманский В.И. Теория кислородно-конверторного процесса. –М.: Металлургия. 1975. - С.376.
90. Явойский В.И., Явойский А.В., Сизов А.М. Применение пульсирующего дутья при производстве стали. –М.: Металлургия. 1985. - С.176.
91. Сизов А.М. Газодинамика и теплообмен газовых струй в металлургических процессах. – М.: Металлургия.1987. - С. 256.
92. Талдыкин И.А., Колганов Г.С. – Изв. вузов. Черная металлургия. 1981. №1. - С. 36-37.
93. Казанцев И.Г. Механика газовой струи в бессемеровской ванне – Сталь. 1940. №1. - С.12-16.
94. D.K. Chibwe, G.Akdogan, G.A. Bezuidenhout, J.P.N. Kapusta, S.Bradshaw, J.J. Eksteen Sonic injection into a PGM Pierce-Smith converter: CFD modelling and industrial trials. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. J. S. Afr. Inst. Min. Metall. vol.115 n.5 Johannesburg May. 2015:
<http://www.saimm.co.za/Conferences/PyroModelling/099-Chibwe.pdf>.
95. A.A. Bustos and J.P. Kapusta, “High Oxygen Shrouded Injection in Copper and Nickel Converters”, Proceedings of the Brimacombe Memorial Symposium, ed. G.A. Irons and A.W. Cramb (Montreal, QC: The Metallurgical Society of CIM, 2000), - P.107–124.
96. Joel Kapusta, Gas jet penetration, smelting intensity, and oxygen efficiency in side blowing versus bottom blowing. Conference Paper · November 2016, интернет ресурс: <http://www.researchgat.net/publication/311627838>

97. Крапухин В.В. Печи для цветных и редких металлов. М.: Metallurgy. 1980. - С.342.
98. Король Ю.А., Набойченко С.С., Гуляев С.В. Практика применения фурм в защитной оболочке при конвертировании // Цветные металлы. 2018. № 6. - С. 14-20.
99. Король Ю.А., Набойченко С.С., Гуляев С.В. использование природного газа в фурмах с защитной оболочкой // Цветные металлы. 2018. № 7. - С. 46-50.
100. Окунев А.И., Костенецкий В.П., Танутров И.Н. Физико-химические и технологические основы обеднения шлаковых расплавов восстановительно-сульфидирующими комплексами // Исследование и разработка технологии извлечения цветных металлов из металлургических шлаков. Сб.статей. – Свердловск. УНЦ АН СССР. 1977. - С. 3-63.
101. Окунев А.И., Костяновский И.А., Донченко П.А. Фьюмингование шлаков – М.: Metallurgy. 1966. - С.259.
102. Андронов В.Н., Чекин Б.В., Нестеренко С.В. Жидкие металлы и шлаки –М.: Metallurgy. 1977. - С.128.
103. Клушин Д.Н. Сульфидирование цветных металлов – М.: Metallurgy. 1968. - С. 212.
104. Андронов В.Н., Чекин Б.В., Нестеренко С.В. Жидкие металлы и шлаки –М.: Metallurgy. 1977. - С.128.
105. Линев В.Д., Рачинский Я.Д., Силенко А.К., Мишин А.И., Коротков С.В. Совершенствование технологии переработки медно-никелевых руд и внедрение прогрессивных проектных решений на никелевых предприятиях Кольского полуострова // Научные исследования и проектные разработки в металлургии никеля, кобальта и олова. Сб. науч. трудов –Л. Гипроникель. 1984. - С. 21-37.
106. Рябко А.Г., Старых В.Б., Цемехман Л.Ш., Распопин В.Г., Копаев Н.Г. Поведение никеля и кобальта при конвертировании медно-никелевых штейнов

- на Норильском ГМК //Совершенствование технологии и улучшения качества продукции в никель-кобальтовом производстве. Сб.науч. трудов. –Л.: Гипроникель. 1981. - С.34-38.
107. Резник И.Д., Кругликова М.С. Сб. науч. трудов Гинцветмета. 1959. № 15.
108. Резник И.Д., Ермаков Г.П., Шнеерсон Я.М. Никель т.2. – М.: Наука и технологии. 2001. - С.467.
109. Чермак Л.Л. Труды института металлургии УФАН. 1958. Вып.2. // Цветные металлы. 1958. №9.
110. Попель С.И., Никитин Ю.П. и др. Взаимодействие расплавленного металла с газом. – Свердловск: УПИ. 1975. - С.184.
111. Ванюков А.В., Зайцев В.Я. Теория пирометаллургических процессов. – М.: Металлургия. 1973. - С.504.
112. Есин О.Г., Гельд П.В. Физическая химия пирометаллургических процессов. Ч.1. Реакция между газообразными и твердыми фазами. – Свердловск: Металлургиздат. 1962. - С. 672
113. Интернет ресурс: https://best-stroy.ru/kupit_kirpich-khromitoperiklazovyyu-khrommagnezitovyyu-khp_37273.
114. Селиванов Е.Н., Федичкин С.А., Книсс В.А., Панкратов В.А. Формы нахождения металлов в шлаке конвертирования никелевых штейнов //Расплавы. 2004. №3. - С. 17-23.
115. Roger Rumbu, Metallurgie Extractive du Cobalt. Logo Wizard. 2013. P.246
116. R. Matuszewicz et al., Using Ausmelt technology for the recovery of cobalt from smelter slags, JOM, October 1998, P.53-56.
117. Y.F. Shen, Selective recovery of nickel and cobalt from cobalt-enriched Ni-Cu matte by two-stage counter-current leaching, Separation and Purification Technology 60 (2008), P 113-119.
118. Кубашевский О., Олкокк К.Б. Металлургическая термохимия. пер. с англ.- М.: Металлургия. 1982. - С. 392

119. Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник. –М.: Химия. 1977. - С.376
120. Морачевский А.Г., Цемехман Л.Ш., Цымбулов Л.Б. Термодинамические системы никель-кислород. Выпуск 12.- СПб.: Изд-во Политехн. ун-та.2008. - С.148.
121. Смирнов В.И., Худяков И.Ф., Тихонов А.И. Извлечение кобальта из конверторных шлаков – Свердловск. Metallurgizdat. 1963. - С. 151.
122. Афанасьев С.Г. Исследование бессемеровского процесса. М.- Metallurgizdat. 1957. - С.111.
123. Казанцев И.Г. Механика газовой струи в бессемеровской ванне. Сталь. 1940. №1. - С.12-16.
124. Цемехман Л.Ш., Ежов Е.И., Певзнер М.И. и др. Автогенная плавка сульфидных медно-никелевых руд с применением погруженного в расплав кислородного дутья. – Сб. "Пирометаллургические процессы в технологии никеля и кобальта", вып.№8. (72). Л.: Гипроникель.1978. - С. 21-24.
125. Фомичев В.Б. Исследование и разработка технологии обеднения шлаков, содержащих никель, кобальт и медь, с использованием восстановительных газов: авт.реф.дис. – СПбГПУ, СПб. 2003. - С.23.
126. Фомичев В.М., Князев М.В., Рюмин А.А. и др. Исследование процесса обеднения шлаков продувкой их газовыми смесями с различным парциальным давлением кислорода// Цветные металлы. – 2002. №9. - С. 32-36.
127. Интернет ресурс: (https://best-stroy.ru/kupit_kirpich-khromitoperiklazovyy-khrommagnezitovyy-khp_37273)
128. Король Ю.А., Набойченко С.С. Совершенствование способа обеднения методом перемешивания фаз // Цветные металлы. 2018. № 8. - С. 37-44