

На правах рукописи

Брагин Владимир Владимирович

**РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ТЕП-
ЛОВЫХ СХЕМ КОНВЕЙЕРНЫХ МАШИН ДЛЯ
ОБЖИГА ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ**

Специальность 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2013

Работа выполнена на кафедре «Теплофизика и информатика в металлургии» ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н.Ельцина» и в ООО «Научно-производственное внедренческое предприятие ТОРЭКС»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Швыдкий Владимир Серафимович

Официальные оппоненты: Кашин Виктор Васильевич
доктор технических наук, старший научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное учреждения науки Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук, старший научный сотрудник лаборатории пирометаллургических процессов.

Жуков Юрий Сергеевич
кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники – ОАО «ВНИИМТ», заведующий лабораторией обжига рудных и нерудных материалов.

Ведущая организация: «Научно-инженерный центр подготовки сырья и рудотермических процессов»
ОАО «Уральский институт металлов»

Защита диссертации состоится **«27» сентября 2013** года в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.285.05 на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н.Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Главный учебный корпус, ауд. I (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Автореферат разослан «20» августа 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук,
профессор

Карелов
Станислав Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Устойчивая тенденция увеличения спроса на высококачественное железорудное сырье определяет необходимость как повышения его служебных свойств, так и снижение затрат на его производство. Опыт эксплуатации существующих морально устаревших обжиговых машин убедительно показывает, что решение одной из этих проблем возможно, как правило, за счет другой. Одновременное их решение возможно лишь путем модернизации тепловой схемы обжиговой машины с повышением степени циркуляции газопотоков, утилизации тепла сбросных газов и обеспечением заданных теплотехнических параметров.

В связи с этим, разработка научных основ и технических решений по созданию тепловых схем обжиговых машин нового поколения, надежная их апробация в ходе модернизации действующих агрегатов, является весьма актуальной.

Цель диссертационной работы - комплексное исследование теплотехнических и физико-химических процессов обжига окатышей для создания энергоэффективных схем тепловой работы обжиговых машин конвейерного типа.

Для достижения поставленной цели выделены следующие **задачи**:

1. Развитие модельных представлений о термообработке слоя окатышей, увязывающих между собой параметры газопотоков, качественные показатели окатышей и технико-экономические показатели их производства.
2. Усовершенствование методик экспериментального обследования обжиговых машин и методов анализа их результатов.
3. Разработка новой энергоэффективной тепловой схемы обжиговой машины.
4. Разработка, апробация и внедрение технических решений при модернизации обжиговых машин ОК-520 ОАО “Михайловский ГОК” (МГОК), Лургин-480 ОАО “Оскольский электрометаллургический комбинат” (ОЭМК) и ОК-520/536 “ОАО «Карельский окатыш»” (КостГОК).

Объект исследования – тепловые схемы обжиговых конвейерных машин для производства железорудных окатышей.

Предмет исследования – влияние элементов тепловой схемы обжиговой машины на технико-экономические показатели производства окатышей.

Методы исследования базируются на принципах физического и математического моделирования слоевых процессов и комплексных инструментальных замеров параметров работы технологического оборудования агрегатов для обжига окатышей. Измерения технологических параметров осуществляли стандартными приборами, прошедшими государственную поверку по стандартным методикам, что определило достоверность полученных результатов.

При обработке экспериментальных данных использован расчетно-теоретический анализ, основу которого составили положения теории тепло- и массообмена и теории металлургических процессов, закон сохранения энергии, при этом противоречий известным физическим и химическим положениям установлено не было.

Научная новизна результатов работы.

1. Усовершенствована методика проведения комплексных инструментальных замеров параметров работы технологического оборудования, позволяющая рассчитывать полный материальный и тепловой балансы термообработки окатышей и получать исходные данные для математического моделирования процесса обжига окатышей.
2. Развита математическая модель термообработки слоя окатышей, в которой впервые учтены процессы десульфурации окатышей, теплообменные процессы в вакуум-камерах и трактах с учетом величины подсосов воздуха через неплотности газоходной системы.
3. Результаты исследований и оценки параметров теплоносителя на входе и выходе коллекторов и газоходов полученные методом математического моделирования.
4. Разработаны новые энергоэффективные схемы обжиговых машин, элементы которых использованы при модернизации действующих конвейерных машин для производства железорудных окатышей.

Практическая значимость работы.

1. Разработаны и реализованы в промышленных условиях технические решения при модернизации обжиговых машин ОК-520 (ОАО «Михайловский ГОК») и Лурги-480 (ОАО «Оскольский электрометаллургический комбинат»). Это обеспечило снижение удельного расхода природного газа на 42,4 % и 9,1% и увеличение производительности на 37,4 % и 25,3 %, соответственно.
2. Разработана тепловая схема новой обжиговой машины, обеспечивающая энергоэффективное производство железорудных окатышей различного назначения – для доменной плавки и металлизации. Тепловая схема реализована в утвержденном проекте строительства комплекса обжиговой машины № 3 ОАО «Михайловский ГОК».
3. Разработаны и реализованы технические решения по модернизации действующих и проектируемых тепловых схем обжиговых машин.

Личный вклад автора. Заключается в постановке цели и задач исследования, разработке его методологии, совершенствовании и адаптации математической модели, участии в проведении лабораторных и опытно-промышленных испытаний на ОАО «Михайловский ГОК», ОАО «ОЭМК», ОАО «Карельский окатыш», и анализе их результатов.

Автор защищает:

1. Методики экспериментального обследования обжиговых машин, позволяющие получать исходные данные для теплотехнических расчетов и адаптации математической модели к конкретным технологиям производства железорудных окатышей.
2. Принципы новой энергоэффективной тепловой схемы обжиговой конвейерной машины.
3. Технические решения по модернизации обжиговых машин и результаты их реализации на обжиговых машинах ОК-520, Лурги-480 и ОК-520/536.

Реализация результатов. Результаты экспериментальных и расчетно-аналитических исследований использованы при разработке технических заданий на модернизацию ОК-306 (СевГОКа), восстановление с модернизацией тепловой схемы обжиговой машины Лурги-278-В (СевГОК), модернизацию тепловой схемы обжиговой машины Лурги-552 (СевГОК), модернизацию тепловой схемы обжиговой машины ОК-324 (ЦГОК), завершение строительства и запуск с модернизацией тепловой схемы обжиговых машин ОК-560 (КГОКОР). Так же материалы работы использованы при расчете и проектировании тепловых схем МОК-189, МОК-108 для поставки ОАО “Уралмашзавод” в Индию, и при проектировании тепловой схемы обжиговой машины площадью 692 м² для Ирана.

Апробация работы. Материалы диссертации доложены и обсуждены на отчетной конференции молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ (г. Екатеринбург 2002 г.) международных научно-практических конференциях «Теория и практика производства чугуна» - 2004, Криворожсталь (г. Кривой Рог, 2004 г.) и «Творческое наследие Б.И.Китаева», ГОУ ВПО УГТУ-УПИ (г. Екатеринбург, 2009 г.)

Публикации. Основное содержание диссертационной работы изложено в 19 научных статьях, из них 15 опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендуемых ВАК.

Структура и объём диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения, изложена на 161 стр. машинописного текста и содержит 18 таблиц, 54 рисунка, список использованной литературы, содержащий 127 наименований и 1 приложение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В соответствии со “Стратегией развития металлургической промышленности в России на период до 2020 г.” (Приказ министерства промышленности и торговли РФ 18 марта 2009 г., № 150) ежегодное производство окисленных окатышей возрастает с 35 млн. т. в настоящее время до 43,5 млн. т., а производство металлized сырьев с 3,4 млн. т до 9,4 млн. т.

В первой главе проведен аналитический обзор существующих тепловых схем обжиговых машин конвейерного типа и подходов к повышению технико-экономических показателей их работы.

Показано, что тепловая схема обжиговой конвейерной машины (ОКМ) должна обеспечивать реализацию режима термообработки слоя окатышей с целью получения ими наиболее высоких металлургических свойств. Другим, не менее важным, назначением современной тепловой схемы является достижение максимальных технико-экономических показателей работы обжиговых машин с минимальными вредными выбросами в атмосферу за счет реализации развитой системы рециркуляционных потоков.

Проведенный анализ технико-экономических показателей производства железорудных окатышей выявил необходимость разработки энергоэффективных тепловых схем для модернизации действующих обжиговых машин и для проектирования обжиговой машины нового, четвертого поколения.

Развитие модельных представлений о термообработке железорудных окатышей состояло в последовательном уточнении решения задачи теплообмена в слое при перекрестном движении теплоносителя и материала. При этом рассматривалась только слоевая задача и (или) отдельные технологические зоны машины, без учета связи различных зон обжиговой машины через газоходную систему, из-за отсутствия надежных методик экспериментального определения параметров работы обжиговой машины.

Аналитический обзор существующих технологий производства окатышей и методов их расчета привел к следующим выводам:

1. Существующие схемы обжигowych машин требуют модернизации на основе современных достижений науки и техники, вследствие:
 - низкого теплового КПД и, следовательно, высокого энергопотребления;
 - низкой степени рециркуляции газопотоков и значительных потерь тепла;
 - недостаточного учета физико-химических, минералогических, реологических свойств исходного сырья и требований к качеству и металлургическим свойствам окатышей различного назначения – для доменной плавки и металлизации.
2. Существующие математические модели не охватывают описание закономерностей формирования качества окатышей с учетом всей гаммы физико-химических процессов (ФХП) и параметров газовоздушных потоков.
3. Отсутствуют надежные методики инструментального определения технологических и тепловых параметров работы обжигowych машин и методы их анализа для разработки технических решений по модернизации.

На основании аналитического обзора работ по совершенствованию режимов обжига и тепловых схем ОКМ сформулированы цель работы и задачи исследования (см. стр. 3).

Во второй главе описаны усовершенствованные методы экспериментального обследования обжигowych машин, а также математическая модель обработки результатов экспериментов.

Усовершенствованный комплекс инструментальных измерений и балансовых испытаний включает расчеты неизмеряемых параметров, составление балансов материальных и газовоздушных трактов в целом по ОКМ, технологических зон и газовоздушных потоков. В комплекс включена оценка рабочих характеристик и параметров работы горелочного, тягодутьевого и газоочистного оборудования. В частности, инструментально определяются: профиль и насыпная масса слоя исходных окатышей, донной и бортовой постели; температурные поля теплоносителя в горне, распределение температуры, давления и состава газов по высоте слоя окатышей, на входе и выходе из слоя по длине машины, параметры газовоздушных потоков (температура, давление и расход) в коллекторах и трактах газоходной системы, параметры работы горелочных устройств и тягодутьевых установок.

По данным инструментальных измерений рассчитываются: материальный баланс процессов окомкования и обжига окатышей, скорости фильтрации через слой окатышей во всех технологических зонах, степень развития физико-

химических процессов (сушки, окисления магнетита, декарбонизации, десульфурации и т.д.), величины подсосов наружного воздуха и выдувов теплоносителя через уплотнения в технологических зонах и неплотности коллекторов и газоходов, материальный и тепловой балансы газоздушных потоков технологических зон и обжиговой машины в целом, в том числе количество потерь теплоты через металлоконструкции и внешние поверхности горнов, коллекторов и газоходов.

Подобный подход применим для множества вариантов тепловых схем с учетом различных конструкций горнов, горелок, степени рециркуляции газов и т.д., так как он удовлетворяет условию полного балансирования газопотоков между зонами нагрева и охлаждения.

Для расчета тепло- и массообменных процессов, протекающих при термообработке окатышей на обжиговой конвейерной машине, необходимы сведения о скорости фильтрации на входе в слой по всей длине машины. Однако, в условиях работы обжиговых машин прямое их измерение (например, при прососе на выходе из колосникового поля) очень затруднено ввиду постоянного движения тележек и малой величины динамического напора (менее 10Па). Получаемые на основе инструментального обследования и разработанной математической модели сбалансированные значения скоростей фильтрации, подсосов, продувов, расходов на дымососах позволили оценить состояние уплотнений, герметичность газоходов, выявить возможность увеличения производительности дымососов и вентиляторов.

Описанная методика носит общий характер и может быть применена для обжиговых агрегатов различного типа.

С использованием разработанной методики на основании инструментальных замеров определено распределение скоростей фильтрации (табл. 1). для каждой зоны действующих обжиговых конвейерных машин ряда фабрик окомкования.

Таблица 1

Средние скорости фильтрации на обжиговых машинах

ГОК	ССГПО	СевГОК	МихГОК	КостГОК	ЦГОК	СевГОК	СевГОК	ОЭМК
обжиговая машина	ОК 108	ОК 306	ОК 520	ОК 520/536	ОК 324	Лурги 278	Лурги 552	Лурги 480
Технологическая зона	Скорость фильтрации, м/с							
Сушка 1	1,15	1,4	1,3	1,3	1,1	1,0	0,9	1,2
Сушка 2	0,75	0,8	1,1	0,6	0,5	0,7	0,7	0,6
Сушка 3	-		0,9					
Нагрев	0,56		0,8					0,4
Обжиг	0,43	0,5	0,5	0,4	0,6	0,6	0,4	
Рекуперация	0,35	0,5	0,5					
Охлаждение 1	0,75	0,9	0,7	0,8	0,9	0,7	0,9	0,9
Охлаждение 2	0,9	1,3	1,1	1,0		0,5	1,0	

С учетом полученных данных рассчитаны тепловые и материальные балансы этих ОКМ. Их анализ позволяет установить основные пути улучшения технико-экономических показателей работы обжиговых машин.

В третьей главе изложены основные этапы и методы развития комплексной математической модели, отвечающей требованиям максимальной адекватности реальным теплофизическим и физико-химическим процессам, протекающим в слое при обжиге железорудных окатышей. Учтены связи зон и коллекторов на современных обжиговых машинах за счет рециркуляции газовых потоков, что позволило отрабатывать и оптимизировать тепловые схемы при реконструкции и создании новых агрегатов. Приведены примеры решения технологических задач с использованием математической модели.

На современных обжиговых машинах значительно увеличена степень рециркуляции газов с целью снижения расхода топлива и уменьшения сбросов на дымовую трубу, что потребовало учесть при моделировании взаимосвязь всех зон и коллекторов обжиговой машины.

При увеличении степени рециркуляции возникают некоторые ограничения, связанные с повышением влагосодержания теплоносителя в первой зоне сушки, увеличивающим область переувлажнения окатышей в слое и приводящим к снижению температуры сбрасываемых газов ниже уровня, допустимого по стойкости оборудования. Особое значение приобретает учет связей коллекторов при обжиге окатышей из сернистых концентратов. Основная сложность решения этой задачи заключается в разработке алгоритма «автоматической» балансировки взаимосвязанных коллекторов по температуре и составу газовых потоков с минимальным увеличением продолжительности вычислительного процесса.

Десульфурация окатышей при их обжиге является довольно сложным процессом, особенно при офлюсовании окатышей. Основная задача при развитии математической модели была связана с учетом кинетики основных реакций: окисления природного пирита (пирротина); образования сульфата кальция в результате взаимодействия диоксида серы с известняком и известью; разложения сульфата кальция в высокотемпературной области. Две последние реакции являются по существу прямой и обратной реакциями, протекающими параллельно, но с пиками интенсивности в различных температурных областях и с различными по знаку тепловыми эффектами. Суммарный тепловой эффект реакций десульфурации является экзотермическим и при начальном содержании серы 0,2 % составляет 10-15% от значения теплового эффекта окисления 2-х валентного железа магнетита.

Модель десульфурации окатышей базируется на балансовом соотношении

$$\frac{\partial \psi_s}{\partial \tau} = \frac{\partial \varphi_s}{\partial \tau} - \frac{\partial \varphi_c}{\partial \tau} + \frac{\partial \varphi'_c}{\partial \tau},$$

где ψ_s – доля серы, выделившейся в газовую фазу;

φ_s – доля окисления пирита или пирротина;

φ_c, φ'_c – для офлюсованных окатышей доли образования и разложения сульфата кальция.

Каждое слагаемое баланса серы является сложной функцией температуры, а для офлюсованных окатышей – и их основности. Эти функции построены пу-

тем соответствующей обработки данных, полученных в лабораторных и промышленных условиях автором и другими исследователями для слоя обжигаемых окатышей и постели.

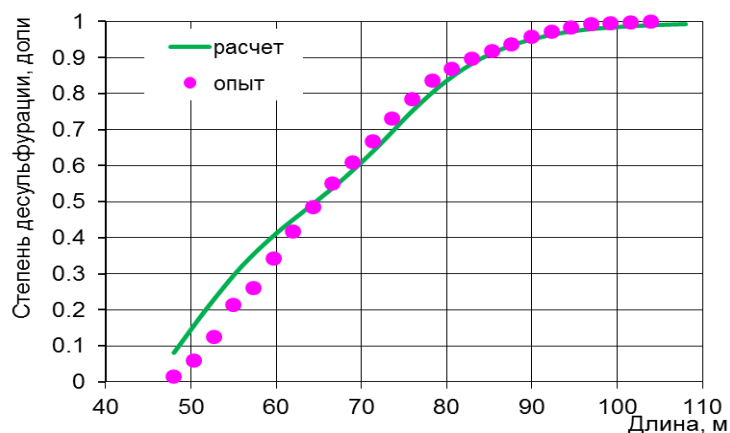


Рис. 1 Сравнение экспериментального и расчетного распределения степени десульфурации по длине обжиговой машины

Адаптация модели была проведена на основе спеканий окатышей из концентратов месторождения “Таежное”, с содержанием серы в концентрате около 2 %. Результаты сравнения экспериментальных и расчетных точек представлены на рис. 1. Полученная адаптированная математическая модель позволила рассчитать тепловую схему обжиговой машины площадью 704 м² для производства окатышей с гарантированным конечным содержанием серы 0,03-0,04 %

Решение этих задач существенно уточнило закономерности тепло-массообмена в слое окатышей и более обоснованно определило подходы к оптимизации тепловых схем обжиговых машин.

В четвертой главе представлено описание разработанных технических решений по совершенствованию тепловых схем ОКМ, приведены результаты их внедрения в ходе модернизации обжиговых машин ОК-520 и Лурги-480, а также созданной новой энергоэффективной тепловой схемы обжиговой машины.

Обследование обжиговых машин ОК-520 Михайловского ГОКа определило существующий уровень параметров их работы, функционирования обжигового оборудования и технико-экономических показателей, а также, выявило ряд «узких» мест. Модернизация предусматривала повышение производительности и снижение удельных расходов энергоносителей.

На первом этапе модернизации обжиговых машин была реализована трехсекционная зона сушки, позволившая значительно интенсифицировать сушку слоя. Практически процесс сушки окатышей стал заканчиваться на площади конструктивной зоны сушки. Достигнуто улучшение расходных характеристик горелок путем калибровки кольцевых газовых щелей, ревизии и корректировки воздушных зазоров в крыльчатках горелок. Снижен коэффициент расхода первичного, низкотемпературного воздуха. Изменены параметры термообработки окатышей и реализована разработанная новая режимная карта. Изменено соотношение площадей зон обжига, рекуперации и охлаждения, проведена реконструкция газоходной системы.

На втором этапе реконструкции зона охлаждения была переведена полностью на продув слоя воздухом. При этом, не теряя в эффективности охлаждения окатышей, добились повышения степени рециркуляции теплоносителя и снижения потерь теплоты с уходящими газами.

Дальнейшие работы по реконструкции были связаны с улучшением использования высокотемпературного воздуха из зоны охлаждения за счет изменения профиля переточного коллектора, снижения газодинамического сопротивления газоходных трактов.

В результате модернизации обжиговых машин ОК-520 производительность возросла на 37,4 %, удельный расход топлива и электроэнергии снизились соответственно на 42,4 % и на 45,9 %, удельные сбросы газов в дымовые трубы сократились на 65,8 % (табл. 2, рис. 2).

Реконструкция показала, что созданные в 1960 – 1970-е годы обжиговые машины Уралмаша имеют значительный резерв по технико-экономическим и теплоэнергетическим параметрам.

Обжиговая машина фирмы "Лурги" рабочей площадью 480 м² введена в эксплуатацию в 1983 г. на Оскольском электрометаллургическом комбинате и предназначена для производства глубокоокисленных окатышей из суперконцентрата Лебединского ГОКа для последующей металлизации на установках "Мид-рекс".

В связи с возрастающим спросом на металлизированные окатыши и планами ОЭМК увеличить объемы их производства была поставлена задача разработать технические решения, способствующие повышению производительности обжиговой машины при заданном качестве окисленных окатышей. На первом этапе модернизации планировалось довести годовой выпуск окисленных окатышей до 3,2 млн т (при производительности машины 404 т/ч) с последующим ростом до 3,6 млн т в год.

Проектная тепловая схема и организация газовоздушных потоков обжиговой машины Лурги-480 не обладает достаточной гибкостью для ее работы с изменяющимися входными параметрами (производительность, изменение количества вводимых в шихту шламов и окалины, физико-химических свойств сырых окатышей и др.). Следует отметить, что тепловая схема современных обжиговых машин Лурги (в настоящее время фирмы "Outotec"), построенных в последнее время и планируемых к строительству в разных странах, в том числе и в России, в основном не отличается от старой схемы машины на ОЭМК и требует, как показало обследование, модернизации.

Чтобы повысить производительность машины Лурги-480 и расширить возможности ее работы в условиях изменения исходных параметров, были реализованы следующие технические решения:

- скорректирован температурно-фильтрационный режим термообработки слоя окатышей с приведением его в соответствие с внутренними источниками тепла и максимально возможным для существующей тепловой схемы снижением теплового дебаланса между зонами нагрева и охлаждения;
- улучшена сушка окатышей путем интенсификации температурно-фильтрационного режима, с последующей модернизацией зоны и обеспечивающих ее газовоздушных потоков;
- повышена эффективность охлаждения слоя окатышей путем изменения фильтрационного режима, перераспределения газовоздушных потоков и реконструкции зоны охлаждения;

Таблица 2.

Показатели модернизации обжиговых машин ОК-520, Лурги-480 и ОК-520/536

Предпри- ятие	Год модерни- зации	Раб. площадь	Производительность машин		Удельные показатели							
		Кол-во машин	годовая, млн. т	часовая, т/ч	Производи- тельность, т/м ² ·ч		Расход природ- ного газа, м ³ /т		Расход электро- энергии, кВт·ч/т		Выбросы в атмо- сферу, тыс. м ³ /т	
						% изм		% изм		% изм		% изм
МихГОК ОК-520	База 1977	520/2	3,7	470	0,90		17,0		37,0		3,8	
	2005	520/2	4,6	580	1,12	+24,4	11,5	- 32,4	25,0	- 32,4	1,6	- 57,9
	2008	520/2	4,9	625	1,20	+33,0	10,1	- 40,6	22,0	- 40,5	1,5	- 60,5
	2012	520/2	5,1	646	1,24	+37,4	9,8	-42,4	20,0	- 45,9	1,3	-65,8
ОЭМК Лурги-480	База 1985	480/1	2,9	360	0,75		11,0		27,0		2,2	
	2004	480/1	3,3	415	0,86	+ 14,7	9,2	- 16,4	27,0	-	2,2	-
	2006	480/1	3,6	450	0,94	+ 25,3	9,0	- 9,1	27,0	-	2,1	- 4,5
КостГОК ОК-520/536	База 2002	520/3	3,5	440	0,85		12,0*		36,4		2,6	
	2009	520/3	3,9	490	0,94	+10,8	8,8*	-26,7	25,7	-29,4	2,6	-

Примечание: топливо – мазут

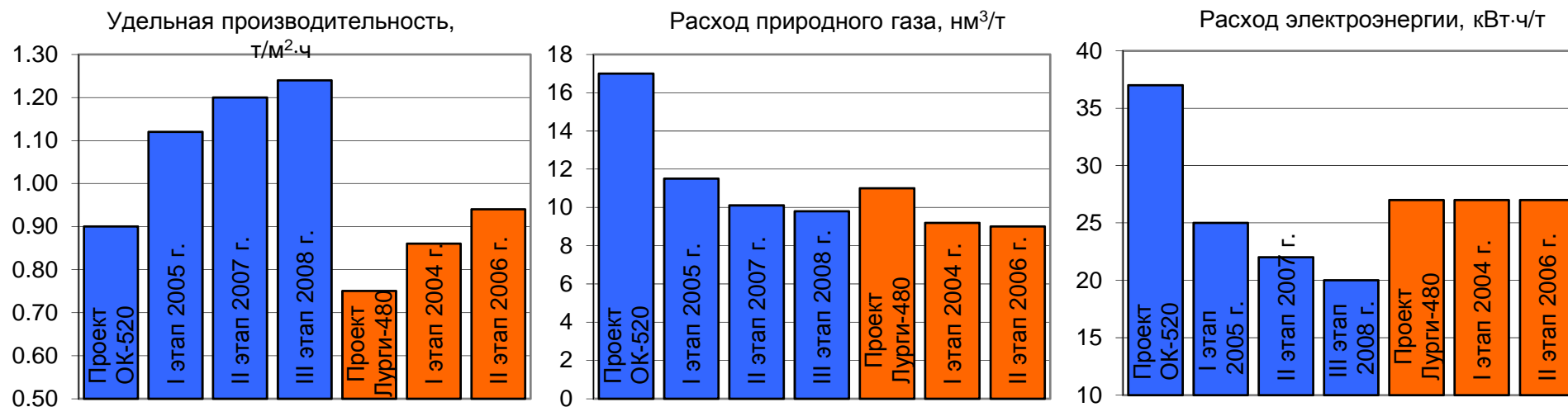


Рис.2. Показатели модернизации обжиговых машин ОК-520 и Лурги-480

- модернизирована тепловая схема и частично реконструирована газоходная система, перераспределены площади технологических зон и газоздушных камер, подключаемых к дымососам; увеличен объем рециркулируемых газов.

В результате модернизации обжиговой машины Лурги-480 производительность возросла на 25,3 %, удельный расход топлива снизился на 9,1 % (табл. 2).

Эффективность каждого этапа модернизации производства достигается за счет разработки и реализации комплекса указанных мероприятий. Как видно из рисунка 2, показатели модернизированного производства ОАО «Михайловский ГОК» превысили показатели работы обжиговых машин фирмы «Лурги».

Модернизированная машина Михайловского ГОКа, несмотря на более передовую тепловую схему по сравнению с обжигowymi машинами фирмы "Лурги" площадью 480 м² (ОЭМК) и 552 м² (Северный ГОК), имеет технологические и конструктивные недостатки:

- окатыши поступают на термообработку с большой исходной влажностью (9,8 – 10 против 8,9 – 9,2 %);
- на рециркуляционных газопотоках применяется газоочистка; установки мокрых газоочисток обладают большим аэродинамическим сопротивлением (до 2,5 кПа) и значительной долей подсосов наружного воздуха (15 – 20 %) по сравнению с электрофильтрами;
- топливо сжигается не инжекционными горелками, а вихревыми (двухпроводными) с существенным перерасходом топлива;
- инжекционные горелки требуют значительно большего расхода высокотемпературного переточного воздуха, а существующий коллектор не может этого обеспечить из-за геометрических размеров и формы;
- конструкция газоходов и сборных коллекторов отличается значительным аэродинамическим сопротивлением;
- более низкий КПД установленных тягодутьевых машин.

И, тем не менее, более совершенная тепловая схема модернизированной ОК-520 обеспечивает технико-экономические показатели производства окатышей на уровне лучших мировых аналогов.

Устранение большинства недостатков, предусмотренных при реализации IV этапа модернизации, позволит на ОК-520 снизить удельный расход природного до 8,9 нм³/т, удельный расход электроэнергии на ТДУ до 14,1 кВт·ч/т. Что значительно превосходит по энергоэффективности лучшие мировые аналоги.

Результаты модернизации обжиговых машин МихГОКа и ОЭМК, реализация технических решений на тепловых агрегатах других предприятий позволили сформулировать основные принципы разработки тепловой схемы и газоходной системы обжиговой машины конвейерного типа. Основными принципами для разработки энергоэффективной тепловой схемы новой ОКМ, апробированными в ходе модернизации действующих обжиговых машин, следует считать следующие:

1. трехсекционная зона сушки;
2. отсутствие реверса в зоне охлаждения;

3. смешение высокотемпературного переточного воздуха с низкотемпературным в форкамерах;
4. балансирование потоков между зонами нагрева и охлаждения;
5. минимальное количество сбросов газов в атмосферу;
6. минимальные затраты электроэнергии на работу ТДМ;
7. максимальное использование теплоты газов, покидающих слой;
8. управление тепловой схемой ОКМ в режиме реального времени;

Термообработка окатышей проводится в пяти технологических зонах: сушки, нагрева, обжига, рекуперации и охлаждения. Размеры их площадей выбираются с расчетом реализации оптимальных скоростей прогрева слоя окатышей в каждой зоне, поскольку медленный прогрев снижает производительность ОКМ, а быстрый ухудшает качество обожженных окатышей. На обжиговых машинах ОК-306 Лебединского ГОКа, ОК-306 Северного ГОКа (Украина), ОК-520 Михайловского ГОКа, ОК-536 Костомукшского ГОКа внедрена трехсекционная зона сушки. С ее помощью удалось интенсифицировать сушку окатышей и повысить производительность ОКМ.

Разделение газопотоков из зон охлаждения по температурному потенциалу позволяет более полно и целенаправленно подавать теплоноситель с требуемой температурой в технологическую зону. С этой целью зона охлаждения поделена на три секции. При охлаждении слоя окатышей из каждой секции выходит теплоноситель с различной температурой. По переточной и газоходной системам различные по температуре теплоносители поступают в зоны сушки, нагрева, обжига и рекуперации. Высокотемпературные газы внутренней рециркуляции поступают в зоны нагрева и обжига посредством перепада давления по переточной системе, а низкотемпературные газы внешней рециркуляции по газоходной системе транспортируют ТДМ. Переточная система состоит из трех конусных футерованных трубопроводов — центрального и двух боковых. По центральному переточному коллектору теплоноситель поступает в зоны сушки и нагрева, по боковым — в зону обжига. В зависимости от назначения окатышей по переточной системе различные по температуре теплоносители подаются в зоны нагрева и обжига. Схема А (рис. 3) с короткой зоной нагрева и длинной зоной обжига предназначена для производства доменных окатышей, именно такая схема реализуется на строящейся обжиговой машине ОАО «Михайловский ГОК». Схема Б (см. рис. 3) с длинной зоной нагрева и короткой зоной обжига более универсальна и может быть использована при производстве окатышей как для металлизации, так и для доменных печей. Благодаря переточной системе для сжигания топлива используется ограниченное количество инжекционных горелок и только в зоне обжига.

Разделение газопотоков по температурному потенциалу позволило также отказаться от установки в зоне нагрева горелок, что позволило повысить окислительный потенциал зоны и обеспечить гарантированные требования к качеству окатышей, в том числе для металлизации.

Максимальное использование теплоты обожженных окатышей и газов обусловлено, помимо внутренней рециркуляции, полнотой использования газов

внешней рециркуляции с помощью газоходной системы. В дымовую трубу сбрасываются только низкотемпературные влажные газы из зоны сушки.

Для каждой технологической зоны предусматривается индивидуальная ТДМ, обеспечивающая более гибкое управление процессом в зоне; разделение газопотоков по температуре и объему; более высокую степень рециркуляции теплоносителей и сокращение количества дымовых газов; уменьшение мощности и более динамичную работу единичной ТДУс высоким КПД в сети с меньшей емкостью; уменьшение диаметров газоходов и коллекторов.

Схема А

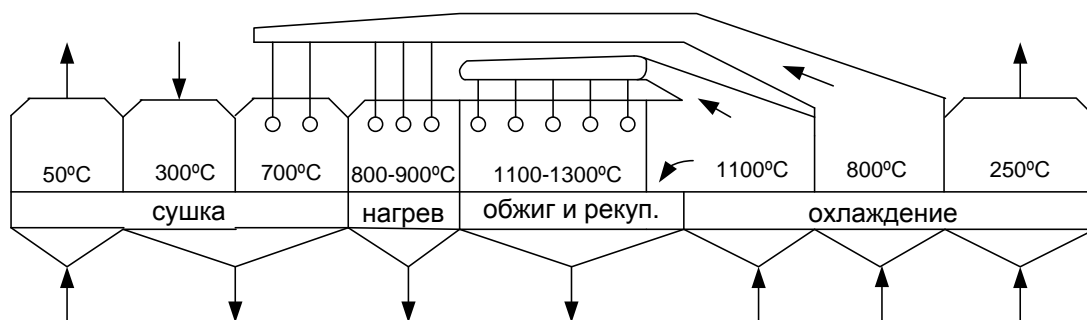


Схема Б

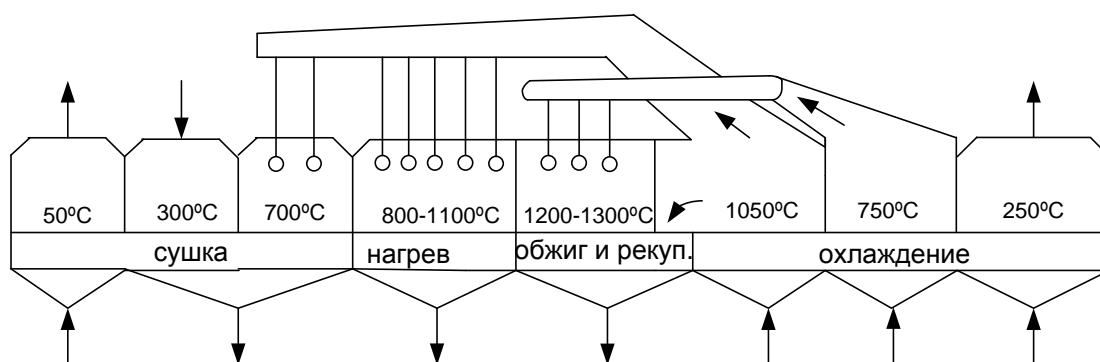


Рис. 3 Тепловая схема ОКМ

Для стабилизации скорости газов и уменьшения аэродинамического сопротивления переточные коллектора выполнены круглого сечения, с плавным уменьшением диаметра, аналогичной круглой формы выполнены и опускные патрубки. Места стыковки опускных патрубков форкамер с переточным коллектором выполняются под углом 45° . Патрубки газоздушных камер имеют плавную стыковку со сборными коллекторами конической формы. За счет более совершенной конструкции продольных уплотнений снижается доля подсосов наружного воздуха. Для футеровки ОКМ предусматриваются изоляционные материалы со значительно более низкой теплопроводностью, чем на действующих машинах. В схеме газоходов для очистки газов от пыли применяются электрофилтры и только перед дымовой трубой. Высокая степень рециркуляции газов в газоходной системе ограничивает количество дымовых газов до $1200 - 1300 \text{ м}^3/\text{т}$, расход теплоты топлива составит примерно 300 МДж/т ($8,4 \text{ м}^3$ природного газа/т), а электроэнергии - менее $20 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$.

Материалы диссертации использованы при проектировании новой обжиговой машины, четвертого поколения, МОК-592 для ОАО «МихГОК» и обжиговых

машин площадью 108 и 189 м², поставляемых ОАО “Уралмашзавод” в Индию. Так же, с учетом усовершенствованных методик обработки экспериментальных данных и усовершенствованной математической модели, проведены обследования и разработаны технические задания на модернизацию ОК-306 (СевГОКа), восстановление с модернизацией технологической линии с обжиговой машиной Лурги-278-В (СевГОК), модернизацию обжиговой машины Лурги-552 (СевГОК), модернизацию обжиговой машины ОК-324 (ЦГОК), завершение строительства и запуск с модернизацией обжиговых машин ОК-560 (КГОКОР) при производстве окатышей из привозного магнетитового концентрата, модернизацию ОК-536-Ф (Каратау) для производства железорудных окатышей. Параметры работы обжиговых машин до и после модернизации, а также стадии реализации, приведены в табл. 3.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

В диссертационной работе, посвященной разработке энергоэффективных тепловых схем обжиговых машин и внедрению их элементов в ходе модернизации существующих агрегатов по обжигу железорудных окатышей, получены следующие основные научные и практические результаты:

1. Сформулирована физическая модель процессов десульфурации офлюсованных и неофлюсованных окатышей в слое и разработана математическая модель удаления серы из слоя окатышей, включающая кинетику десульфурации, материальные и тепловые балансы материала и газа. Модель десульфурации добавлена в существующую математическую модель процесса окислительного обжига окатышей на конвейерной машине.
2. Усовершенствована методика проведения комплексных инструментальных измерений параметров работы коллекторов и газоходов, тягодутьевых машин, теплового состояния и качества окатышей по высоте слоя, позволяющая рассчитывать полный материальный и тепловой балансы ОКМ в целом.
3. Разработаны и реализованы технические решения по совершенствованию тепловых схем обжиговых машин ОК-520 (МихГОК), Лурги-480 (ОЭМК), ОК-520/536 (КостГОК), приведены результаты их реализации.
4. Разработана энергоэффективная тепловая схема новой обжиговой машины четвертого поколения МОК-592, которая принята к реализации для строящегося технологического комплекса на ОАО «Михайловский ГОК».
5. Результаты экспериментальных и расчетно-аналитических исследований, применены для разработки технических заданий на модернизацию ОК-306 (СевГОКа), восстановление с модернизацией тепловой схемы обжиговой машины Лурги-278-В (СевГОК), модернизацию тепловой схемы обжиговой машины Лурги-552 (СевГОК), модернизацию тепловой схемы обжиговой машины ОК-324 (ЦГОК), для завершения строительства и запуска модернизированной тепловой схемы обжиговых машин ОК-560 (КГОКОР). Также материалы работы применены при расчете и проектировании тепловых схем МОК-189, МОК-108 ОАО “Уралмашзавод” для поставки в Индию и при проектировании тепловой схемы обжиговой машины площадью 692 м² для Ирана.

Таблица 3

Показатели модернизации обжиговых машин

Предприя- тие	Год мо- дерни- зации	Раб. площадь	Производитель- ность машин		Удельные показатели								Примечания
		Кол-во ма- шин	годовая, млн. т	часовая, т/ч	Производи- тельность, т/м ² ·ч		Расход природного газа, нм ² /т		Расход элек- троэнергии, кВт·ч/т		Выбросы в ат- мосферу, тыс.м ³ /т		
						% изм.		% изм.		% изм.		% изм.	
Северный ГОК ОК-306	База 2005	306/1	2,0	263	0,86		18,8		29,0		3,4		реализовано
	2008		2,1	285	0,93	+8,4	16,4	- 12,2	28,0	-3,4	2,8	- 17,6	
	2011		2,4	310	1,01	+15,0	14,0	- 23,0	28,5	-1,7	2,8	- 17,6	
Северный ГОК Лурги пл.278 м ²	База 2006	278/1	1,8	236	0,85		20,0		23,0		4,0		Монтаж оборудования
	2008-2013		2,1	278	1,0	+ 15,0	14,5	- 27,5	22,4	-2,7	1,8	- 55,0	
Северный ГОК, Лурги пл.552 м ²	База 2008	552/2	3,8	505	0,92		17,5		24,0		3,5		Обследование, раз- работка решений по модернизации
	2011		4,2	552	1,0	+ 10,8	14,0	- 20,0	22,0	- 8,5	3,1	-12,9	
Централь- ный ГОК ОК-324	Проект 1992	324/1	2,3	285	0,88		18,9		25,5		3,7		Реализовано
	2011		2,3	285	0,88	-	10,8	-10,1	23,4	-8,2	3,5	-5,4	
	2012		2,5	317	0,98	+10,2	9,7	-8,98	20,4	-12,8	3,0	-14,3	
КГОКОР ОК-560	Проект 1995	560/3	3,4	433	0,77		29		32		-	-	Переход с произ- водства окислен- ных окатышей на магнетитовые. Ис- ходные данные для ТЭО достройки
	2007		4,75	600	1,07	+38,2	10	-65.5	25	-21,9	-	-	

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основное содержание работы отражено в следующих печатных работах:

В рецензируемых научных журналах и изданиях рекомендованных ВАК России:

1. Универсальная математическая модель тепломассообмена в слое при обжиге окатышей на конвейерной машине./ Б.А. Боковиков, В.В. Брагин, Г.М. Майзель, В.М. Малкин // Сталь - 2002 г - № 4, - с.29-34.
2. Методика определения скоростей фильтрации на обжиговой машине конвейерного типа./ А.А. Авдеенко, В.В. Брагин, М.А. Воробьев, С.Н. Евстюгин, А.А. Кучин // Сталь - 2003 г. - № 9, - с.32-33.
3. Модернизация обжиговых машин ОК-520 ОАО Михайловский ГОК./ В.М. Абзалов, Б.И. Борисенко, В.В. Брагин, В.П. Бруев, В.Н. Неволин // Сталь – 2005 г. - № 2, с. 3-4.
4. Теплотехническое обследование и технические решения по увеличению производительности обжиговой машины фирмы Лурги./ В.М. Абзалов, В.В. Брагин, Е.И. Гонтарук, Г.А. Зинягин, В.Н. Неволин, Н.А. Шляхов // Сталь – 2005 г. - № 2, с. 7-8.
5. Влияние влажности окатышей на газопроницаемость слоя и показатели работы обжиговых машин./ В.В. Брагин, В.И. Клейн, А.А. Солодухин, А.В. Стародумов // Сталь – 2006 г. - № 6, с. 31-32.
6. Эффективность модернизации фабрики окомкования ОАО “Михайловский ГОК”./ В.М. Абзалов, Б.И. Борисенко, В.В. Брагин, С.Н. Евстюгин, Н.Н. Копоть, С.И. Кретов, В.Н. Неволин // Сталь – 2006 г. - № 6, с. 9-10.
7. К вопросу о выборе рациональной площади зоны охлаждения конвейерной обжиговой машины./ Б.А. Боковиков, В.В. Брагин, В.И. Клейн, М.И. Найдич // Сталь – 2006 г. - № 6, с. 33-35.
8. Модернизация действующих обжиговых машин./ В.М. Абзалов, Б.И. Борисенко, В.В. Брагин, Ю.П. Калинин, А.В. Кононыхин, В.Н. Неволин // Сталь – 2008 г. - № 12, с. 6-7.
9. Разработка обжиговой конвейерной машины нового поколения./ В.М. Абзалов, В.В. Брагин, А.А. Вяткин, С.Н. Евстюгин, С.Н. Лелеко // Сталь – 2008 г. - № 12, с. 13-14.
10. Влияние усадки слоя на его газодинамическое сопротивление в процессе термообработки на обжиговой машине./ Б.А. Боковиков, В.В. Брагин, В.И. Клейн // Сталь – 2008 г. - № 12, с. 30-34.
11. Эффективность работы зон сушки обжиговых машин./ В.М. Абзалов, В.В. Брагин, В.И. Клейн, А.А. Солодухин // Сталь – 2008 г. - № 12, с. 25-27.
12. Опыт модернизации обжиговых машин России и стран СНГ./ В.М. Абзалов, В.В. Брагин, А.И. Груздев, В.Н. Неволин, А.В. Судай // Сталь – 2010 г. - № 9, с. 7-9.
13. Стратегия создания тепловых схем обжиговых конвейерных машин В.М. Абзалов, В.В. Брагин, С.Н. Евстюгин, В.И. Клейн, А.А. Солодухин // Сталь – 2010 г. - № 9, с. 10-12.

14. Пути модернизации технологического обжига хромитовых окатышей и оборудования производства фирмы "Outotec". / В.В. Брагин, А.И. Груздев, А.Ю. Поколенко, О.Е. Привалов, А.Б. Разин, Т.В. Сапожникова, А.В. Стародумов // Сталь – 2010 г. - № 9, с. 26-29.
 15. Опыт использования эффективных тягодутьевых установок при производстве железорудных окатышей. / В.В. Брагин, М.А. Воробьев, М.А. Кондраков, А.В. Судай, О.С. Шахтер // Сталь – 2010 г. - № 9, с. 38-40.
- В тезисах докладов:
16. Математическая модель десульфурации неофлюсованных железорудных окатышей в процессе окислительного обжига на конвейерной машине. / В.В. Брагин // научные труды III отчетной конференции молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, Екатеринбург 2002 г, с 104-105.
 17. Технологическая модернизация обжиговых машин СНГ. / В.В. Брагин, А.А. Солодухин, В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко // международная научно-техническая конференция «Теория и практика производства чугуна» - 2004 г. - с. 192-196.
 18. Обжиговая машина нового поколения для производства окатышей с высокими металлургическими свойствами. / В.В. Брагин, А.А. Солодухин, В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко // международная научно-техническая конференция «Теория и практика производства чугуна» - 2004 г. - с. 196 – 200.
 19. Теплообмен в слое железорудных материалов при перекрестной схеме и наличии стоков и источников теплоты. / В.В. Брагин, Б.А. Боковиков, В.М. Малкин, М.И. Найдич // международная научно-практическая конференция «Творческое наследие Б.И. Китаева» - 2009 г. - с. 124-125.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность за поддержку и ценные замечания доктору технических наук, действительному члену Академии инженерных наук РФ Ю.Г.Ярошенко, научному руководителю, проф. д.т.н. Швыдкому В.С. и научным консультантам к.т.н. Абзалову В.М. и д.т.н. Боковикову Б.А.

Автор благодарит сотрудников ООО «НПВП ТОРЭКС» и кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» Уральского Федерального Университета им. первого Президента России Б.Н.Ельцина за ценные замечания и помощь в подготовке диссертации.

Подписано в печать 19.08.2013

Бумага 80 г/м²

Уч.-изд. л.1,02

Цифровая печать

Тираж 100 экз.

Формат 60х84 1/16

Усл. печ. л. 1,39

Заказ № 238

Отпечатано в учебной лаборатории
полиграфических машин кафедры ДМ УрФУ
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-120.
Тел.:(343) 375-41-43