

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН**

ИННОВАЦИОННЫЙ ЕВРАЗИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 44.09.35

Мыктыбаева Г.К.

**Исследование и разработка новых технических решений по повышению
энергоэффективности производства агломерата**

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

специальность - 6М071700 «Теплоэнергетика»

Павлодар 2015

Министерство образования и науки Республики Казахстан

Инновационный Евразийский университет

«Допущен к защите»
Директор департамента
«Энергетика и металлургия»,
_____ А.К.Кинжибекова

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

**На тему: «Исследование и разработка новых технических решений по
повышению энергоэффективности производства агломерата»**

по специальности 6М071700 «Теплоэнергетика»

Выполнил магистрант
группы ТЭ(м)-202 _____ Г.К. Мыктыбаева

Научный руководитель,
доктор технических наук, профессор _____ И.К. Ибраев

Павлодар 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	5
ВВЕДЕНИЕ	6
1 Постановка и решения проблем повышения энергоэффективности теплотехнических процессов	11
1.1 Краткая характеристика принятой технологии производства марганцевого и хромового агломерата на АЗФ	11
1.1.1 Технологический процесс производства агломерата	11
1.2 Использование ВЭР металлургического производства	16
1.3 Классификация вторичных энергоресурсов	18
1.4 Источники образования вторичных энергоресурсов и способы их утилизации	19
1.5 Современные отечественные и зарубежные технологии повышения энергоэффективности агломерационного процесса и утилизации ВЭР	22
1.5.1 Система утилизации отходящих газов агломерационной установки	22
1.5.2 Агломерационный процесс с тепловой точки зрения	26
1.5.3 Исследование теплообменных процессов при агломерации	29
1.6 Зажигательный горн	35
2 Исследование тепломассообменных процессов при агломерации	44
2.1 Процесс спекания агломерата на агломашине	44
2.2 Разработка математической модели агломерационного процесса	49
2.3 Исследование газодинамики агломерационного процесса	56
3 Пути повышения теплотехнических и экологических показателей работы агломерационных машин	62
3.1 Анализ опыта работы агломерационных машин с рециркуляцией аглогазов	62
3.2 Исследование и разработка рециркуляции агломерационных газов на агломашине АЗФ	67
3.3 Разработка способа агломерации с рециркуляцией агломерационных газов	73
3.4 Интенсификация процессов теплообмена при агломерации марганцевого концентрата	76
4 Разработка и изготовление зажигательного горна агломашин с комбинированной системой отопления	79
4.1 Исследование процессов теплообмена и фильтрации газов при агломерации	79
4.2 Опыт разработки и освоения зажигательных горнов агломерационных машин	83
5 Оценка технико-экономической эффективности предлагаемых	91

	технических решений	
5.1	Комплексное использование сырья, отходов производства, вторичных энергоресурсов	91
5.2	Подбор альтернативных восстановителей для агломерации	94
5.3	Технико-экономическая эффективность внедрения предложенных технических решений	98
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	103
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	105

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящей магистерской диссертации использованы обозначения и сокращения:

МАК-60/120 – машина агломерационная конвейерная с площадью спекания 60 м^3 , общей площадью 120 м^3 ;

АО ТНК «Казхром» – акционерное общество транснациональная компания «Казхром»;

АЗФ – Аксуский завод ферросплавов;

ХМИ им. Ж.Абишева – химико-металлургический институт им. Ж.Абишева;

ЦПШ – цех подготовки шихты;

АСУ ТП – автоматизированные системы управления технологическим процессом;

ВЭР – вторичные энергетические ресурсы;

ДонНИИЧМ – Донецкий научно-исследовательский институт черной металлургии;

ПДК – предельно-допустимая концентрация;

ОТК – отдел технического контроля;

КПД – коэффициент полезного действия.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Роль агломерационного производства в загрязнении окружающей среды весьма значительна. На большинстве предприятий черной металлургии с полным технологическим циклом, доля выбросов агломерационного производства в общем количестве валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу достигает 50-60 %. Это обусловило актуальность проблемы повышения экологической безопасности агломерационного производства и снижения техногенной нагрузки на территории, прилегающие к этому производству.

Рост спроса на металлопродукцию, главным образом наблюдаемый на быстро развивающихся рынках, в существенной мере влияет на издержки связанные с сырьевыми материалами, металлолом, логистикой и энергоносителями. Постоянное повышение цен и интенсивная конкуренция среди металлургических предприятий привели к резкому снижению прибыльности производств. Для успешного функционирования в условиях увеличения издержек все операторы аглофабрик должны обеспечивать работу своих предприятий с максимальной производительностью, одновременно снижая потребление электроэнергии и твёрдого топлива.

Основная задача, стоящая перед операторами аглофабрик, заключается в обеспечении высокой производительности при низких эксплуатационных затратах. Высокое качество агломерата, как основного компонента ферросплавной шихты, играет ключевую роль для обеспечения высокой и устойчивой производительности печи при низком расходе восстановителей.

В то же время современный мировой рынок марганцевых и хромистых ферросплавов, для которого характерна снижающаяся прибыльность и усиливающаяся конкуренция, требует от производителей максимального сокращения издержек производства за счет использования более подготовленных к электроферросплавным переделам минерально-сырьевых материалов (марганцевых руд и концентратов, специальных видов углеродистых восстановителей); экономии при этом потребляемого топлива; оптимизации параметров эксплуатации современных рудовосстановительных мощных и сверхмощных электропечей; применения информационных технологий, обеспечивающих производство марганцевых ферросплавов с минимальными затратами сырьевых и электроэнергетических ресурсов при полном учете всех экологических аспектов технологии.

Природоохранные нормы становятся все более строгими во всех странах мира. Это особенно остро отражается на аглофабриках с их большими объёмами выбросов, которым органы, ответственные за охрану окружающей среды, уделяют особое внимание. Штрафы в виде сертификатов на выбросы CO_2 представляют собой серьезную угрозу долгосрочному и устойчивому росту. Повторное использование отходов и сокращение выбросов в атмосферу является одним из самых важных мероприятий по повышению экологической совместимости, в частности, потому что процесс агломерации является одним

из главных источников выбросов в цикле металлургического производства. В целях сокращения удельного объема отходящих газов, пыли и прочих вредных выбросов необходимо обеспечить постоянную модернизацию оборудования и выполнение мер по контролю над загрязнением окружающей среды.

Традиционный процесс агломерации – весьма энергоемкий, таким образом, имеется значительный потенциал снижения энергопотребления, объема выбросов и издержек, которая должна отвечать следующим требованиям:

- высокая степень надежности в работе и эксплуатационная готовность оборудования;
- гибкости в использовании сырьевых материалов;
- стабильность производственного процесса
- энергоэффективная эксплуатация

Основным путем кардинального решения проблемы защиты окружающей среды от этих выбросов является разработка новых и совершенствование существующих технологических процессов, создание новых видов газоочистного и пылеулавливающего оборудования, разработка способов и средств интенсификации процессов улавливания загрязняющих веществ, образующихся при агломерации марганец- и хромсодержащих материалов, рациональное использование энергоресурсов в сочетании с максимальным использованием отходов производства.

Среди приоритетных направлений повышения эффективности производства крупнотоннажных марганцевых и хромистых ферросплавов перспективными и значимыми являются сокращение удельных расходов шихтовых материалов, увеличение коэффициента полезного сквозного извлечения металла в товарные ферросплавы, снижение потребления газа и твердого топлива, удельного расхода электроэнергии и решение сложных задач по охране окружающей среды, определяющих экологическую ситуацию в соответствующем регионе.

Одним из путей решения проблемы является теоретическое обоснование применения ферросплавного газа, рециркуляции аглогазов, совершенствование режимов зажигания аглошихты и сокращение удельного расхода топлива (мелких фракций кокса) при агломерации. Анализ особенностей теплотехнических процессов зажигания аглошихты показал при использовании отходящих колошниковых газов от ферросплавных электропечей ферросплавного газа.

Цель диссертационной работы:

– выработка научно обоснованного подхода к совершенствованию электрометаллургических процессов, являющихся взаимосвязанными звеньями сквозной технологической схемы производства марганцевых и хромистых ферросплавов. В качестве научной основы автором предложено сведение к минимуму избыточной неопределенности в сложных технологических операциях по степени их незавершенности и по энергоэффективности,

оцениваемой по удельному расходу электроэнергии на производство ферросплавной продукции.

- изыскание путей повышения экологической безопасности агломерационного производства за счет снижения вредных выбросов в окружающую среду, и негативного воздействия этого производства на экосистемы промышленных комплексов без снижения объемов производства и ухудшения качества производимого агломерата.

- исследование теплотехнических особенностей процесса аломерации и создание энергоэффективной конструкции зажигательного горна.

Основные задачи диссертационной работы:

- изыскать и научно обосновать способы совершенствования технологического процесса получения агломерата, обеспечивающие снижение вредных выбросов в окружающую среду, расхода топлива и восстановителя;

- определить научно обоснованные способы повышения эффективности производства марганцевого и хромового агломерата и очистки аглогазов, выбрасываемых в окружающую среду;

- разработать методику расчета продолжительности зажигания агломерационной шихты с учетом ее свойств и вида газообразного топлива;

- разработать энергоэффективную конструкцию зажигательного горна, отопляемого различными видами газообразного топлива;

- разработать алгоритм и система автоматического управления работой горна с учетом полного цикла работы агломашины.

Идея работы: применение комплексного подхода к решению проблемы повышения энергоэффективности агломерационного производства за счет вовлечения в производства вторичных энергоресурсов ферросплавного производства, снижения вредных выбросов в окружающую среду путем совершенствования технологического процесса в сочетании с техническими мероприятиями, обеспечивающими повышение энергоэффективности и эффективности очистки выбрасываемых аглогазов.

Методы исследований. Для решения поставленных задач использовались известные методики определения физических и физико-химических свойств улавливаемой пыли в сочетании с оригинальными методиками и установками, дающими возможность прогнозировать результаты очистки аглогазов от вредных веществ. Обработка результатов экспериментальных исследований проводилась с применением современного математического аппарата.

Научные положения, представленные к защите

1. Высокое теплосодержание аглогазов, наличие в них оксида углерода при достаточном содержании кислорода в создаваемой газовой смеси, за счет применения научно-обоснованной системы отбора газов и подачи их под специальное укрытие зоны спекания позволяют осуществлять процесс рециркуляции аглогазов, обеспечивая снижение выбросов загрязняющих веществ и экономию энергоресурсов.

2. Воздействие высокочастотных акустических потоков на пористую структуру спекаемой шихты позволяет интенсифицировать процессы беспламенного горения и тепломассообмена в зоне спекания агломашиин.

3. Акустическая обработка запыленных поверхностей звуковыми потоками с изменяющейся частотой колебаний вызывает разрушение дисперсной структуры пылевых отложений, что обеспечивает регенерацию этих поверхностей, позволяющую повысить эффективность работы пылеулавливающих аппаратов, в частности, электрофильтров аспирационных систем аглофабрик.

Достоверность результатов исследований подтверждается большим объемом аналитических и экспериментальных исследований, высокой сходимостью численных расчетов, лежащих в основе выдвинутых теоретических положений с данными промышленных испытаний, большим объемом фактического материала.

Научная новизна работы заключается:

- в развитии теоретических положений, лежащих в основе процесса агломерации, и теоретическом обосновании возможности применения операции рециркуляции аглогазов на действующих агломерационных машинах;

- в установлении закономерности изменения показателей процесса агломерации с применением операции рециркуляции на основе анализа полученных зависимостей характеристик выбрасываемых в окружающую среду аглогазов от вещественного состава рециркулята, теплофизических и газодинамических параметров процесса агломерации;

- в теоретическом обосновании целесообразности акустической обработки зоны спекания аглошихты и установлении основных закономерностей этого процесса;

- установлена зависимость количества выгоревшего углерода топлива шихты от концентрации кислорода в продуктах сгорания газообразного топлива в горне.

- получено выражение для расчета скорости фильтрации продуктов сгорания через слой под горном и степени дросселирования вакуум-камер при нагреве шихты и в режиме зажигания.

- разработана методика расчета времени зажигания агломерационной шихты в зависимости от конкретных начальных условий, включающих характеристики шихтовых материалов, вид газообразного топлива и планируемые затраты тепла на зажигание.

Практическая значимость работы заключается:

- в создании и промышленном освоении системы рециркуляции аглогазов на агломашинах МАК-60/120;

- применении технических средств акустической обработки зоны спекания агломерата, обеспечивающих интенсификацию процессов тепломассообмена в спекаемом слое шихты;

- определение зависимости количества углерода твердого топлива, переходящего в газ из слоя под горном, от содержания кислорода в продуктах сгорания.

- разработка методики расчета режима зажигания, конструкции горна и горелок для агломерационных машин МАК-60/120;

- участие в разработке схемы рециркуляции аглогаса на агломашине МАК-60/120. Участие в разработке схемы работы горна на ферросплавном газе с применением новой конструкции горелок, подаваемым в горелки горна и в слой за горном на агломашине МАК-60/120.

Реализация результатов диссертационной работы.

- разработана методика расчета времени зажигания агломерационной шиты (для горна) в зависимости от конкретных начальных условий.

- разработана базовая конструкция горна для зажигания шихты, обеспечивающего энергосберегающую технологию агломерации за счет плавного изменения температуры шихты по длине горна, равномерного нагрева по ширине горна, возможности использования нагретого воздуха от охлаждения спека и рециркуляции дымовых газов.

- предложения по совершенствованию технологического процесса, созданию технических средств снижения вредных выбросов в окружающую среду прошли промышленные испытания.

Личный вклад автора. Работа содержит результаты исследований, выполненных лично автором по анализу состояния проблемы экологической безопасности агломерационного производства предприятий черной металлургии, составлению методики проведения промышленных испытаний и определению параметров аглогазов. Лично автором проведен комплекс исследований процесса агломерации с рециркуляцией части аглогазов, отводимых от зоны спекания, созданию систем рециркуляции аглогазов и акустической обработки зон спекания аглошихты.

Публикации. Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка из 46 наименований. Она изложена на 106 страницах машинного текста, содержит 13 таблиц и 31 рисунок.

Статья «Подбор альтернативных восстановителей для агломерации» опубликована в сборнике материалов международной научной конференции молодых ученых, магистрантов, студентов и школьников «XV Сатпаевские чтения», Павлодар, том 21, 2015 год, а также статья «Пути повышения энергосбережения при производстве агломерата на Аксуском заводе ферросплавов ТНК «Казхром» опубликована в научном журнале «Вестник Инновационного Евразийского национального университета», № 2, 2015г.

1 Постановка и решения проблем повышения энергоэффективности теплотехнических процессов

1.1 Краткая характеристика принятой технологии производства марганцевого и хромового агломерата на АЗФ

Производственная программа аглофабрики включает окучивание двух типов руд для двух видов агломерата: неофлюсованный марганцевый агломерат 80 тыс.т/год; офлюсованный хромовый агломерат 270 тыс.т/год.

Смешивание указанных типов руд в технологическом процессе агломерации недопустимы, поэтому при переходе с одного типа агломерата на другой предусматривается полная очистка конвейерных трактов, эстакад и агломашины от остатков шихтовых материалов предыдущего производства.

В основу производства неофлюсованного марганцевого агломерата и офлюсованного хромового агломерата на агломерационной фабрике Аксуского завода ферросплавов положен технологический процесс, разработанный совместно со специалистами ООО «Уралмаш-Метоборудование» и «Химико-металлургический институт им.Ж.Абишева» на основании лабораторных исследований и промышленных испытаний.

По отчету о научно-исследовательской работе ХМИ им.Ж.Абишева по теме: «Исследования по обработке оптимальных условий агломерации мелкодисперсных руд». Караганда 2007г. ООО «Уралмаш-Метоборудование» разработал технологию производства агломерата на Аксуском заводе ферросплавов и изложил ее в технологическом задании на агломерационный цех производительностью по агломерату 350тыс.т. в год. ООО «Уралмаш-Метоборудование» разработал технологию производства двух видов агломерата на одной агломашине попеременно, что удешевляет реализацию предложенной технологии, снижает затраты на эксплуатацию и обусловлено ограничениями размеров отведенной заказчиком промплощадки под строительство аглофабрики.

1.1.1 Технологический процесс производства агломерата

Технологический процесс производства агломерата включает следующие операции:

- доставка исходных сырьевых материалов железнодорожными автомобильным транспортом на станцию разгрузки;
- прием сырьевых материалов в отделении шихтоподготовки;
- дозирование сырьевых материалов в отделении шихтоподготовки;
- смешивание дозированных сырьевых материалов в отделении смешивания;
- окомкование шихты в отделении спекания;
- укладка шихты и постели на агломашину;
- спекание и охлаждение аглоспека на агломашине;

- дробление аглоспека в щековой дробилке;
- выделение возврата, постели и сортового агломерата на грохоте;
- складирование агломерата на складе агломерата;
- погрузка агломерата на узле погрузки в железнодорожные вагоны;
- поставка агломерата в ферросплавное производство завода.

Доставка исходных сырьевых материалов производится железнодорожным и автомобильным транспортом на станцию разгрузки. Рабочим проектом предусматривается выгрузку железнодорожных вагонов и автомобилей производить в отделении «больных» вагонов. Если, по условиям работы существующего ферросплавного производства, возможно использовать существующий вагоноопрокидыватель, то железнодорожные вагоны будут разгружаться в бункер вагоноопрокидывателя. Далее, предусмотренной в настоящем рабочем проекте, системой ленточных конвейеров сырье подается в бункеры отделения шихтоподготовки.

В отделении шихтоподготовки при помощи разгрузочных тележек, установленных на ленточных конвейерах, сырьевые материалы загружаются в бункеры. Через дозаторы ленточные непрерывные, по весу сырье из бункеров дозируется на ленточные конвейеры и через перегрузочный узел, ленточным конвейером КЛ17 подаются в отделение смешивания. После перемешивания в отделении смешивания шихта по ленточным конвейерам через перегрузочный узел ПУ3 подается в расходный бункер отделения спекания. Из расходного бункера отделения спекания автоматическим весовым дозатором шихта подается в барабан-окомкователь. Окомкованная шихта челноковым распределителем шихты загружается в приемный бункер агломашины.

Из бункеров постели дозируется весовым дозатором постель и ленточным конвейером загружается в приемный бункер постели агломашины. Окомкованная шихта укладывается на спекательную тележку агломашины на слой постели (50мм) слоем 450мм.

Уложенная на аглоленту шихта слоем заданной толщины поджигается газовым зажигательным горном. Спекание и охлаждение осуществляется на одном агрегате-агломашине путем прососа воздуха через спекаемый и охлаждаемый слой. Охлажденный спек дробится в щековой дробилке, установленной в конце агломашины на сходе с нее спека. Дробленый агломерат разделяется на фракции в инерционном грохоте. Фракции 0-8мм (возврат) возвращается в шихту на конвейер. Фракция 8-15мм (постель) укладывается на конвейер КЛ18 и направляется системой конвейеров через перегрузочные узлы в бункеры постели. Фракция 15-100мм укладывается на конвейер и направляется ленточным конвейером К через перегрузочный узел на склад агломерата или на перегрузочный узел ПУ7. Далее системой ленточных конвейеров через перегрузочный узел агломерат подается либо в бункеры узла погрузки в железнодорожные вагоны либо на перегрузочный узел, где по течкам направляется в существующее ферросплавное производство завода.

Все поступающие сырьевые материалы проходят выборочный входной пиротехнический и радиационный контроль в существующей на Аксуском

заводе ферросплавов заводской лаборатории. В лаборатории имеются радиометр-дозиметр МКС-01Р, и радиометр-дозиметр МКС-РМ 1402М, а также специально обученный персонал.

Подготовка всех сырьевых материалов производится в существующем заводском цехе ЦШП-2 на существующем оборудовании. Входной качественный контроль поступающих на аглофабрику сырьевых материалов производится выборочно в лаборатории, расположенной в АБК. Отбор проб предусматривается в отделении шихтоподготовки. Для этого на отметке 17500мм отделения шихтоподготовки предусмотрена комната отбора проб, оснащенная соответствующим оборудованием. Отбор проб производится плужком с ленточного конвейера, без его остановки, каждые 40 мин. Для выполнения этого требования аглофабрика оснащается автоматизированной системой отбора и подготовки проб готовой продукции – лабораторией готового агломерата.

Технологическая схема опробования агломерата состоит из трех систем, работающих в параллельно-последовательном режиме:

1. Определение гранулометрического состава агломерата;
2. Определение механических свойств агломерата;
3. Подготовка пробы на химический анализ.

Управление технологическим процессом производства агломерата производится автоматизированной системой управления – АСУ ТП аглофабрики.

Технологическая схема производства неофлюсованного марганцевого агломерата приведена на рисунке 1.1.

Технологическая схема производства офлюсованного хромового агломерата приведена на рисунке 1.2.

Техническая характеристика агломашины МАК- 60/120 для марганцевого (числитель) и хромового (знаменатель) агломерата приведена ниже:

Площадь спекания, м ²	48/60
Площадь охлаждения мерата, м ²	72/60
Производительность по годному агломерату, т/час	52,5/42,2
Ширина рабочей поверхности, м	3,0
Длина рабочей поверхности, м	40
Высота спекаемого слоя, мм	до 500
в том числе высота слоя постели	50 min
Скорость движения тележек, м/мин	0,3-3,0
Масса, т	830,6

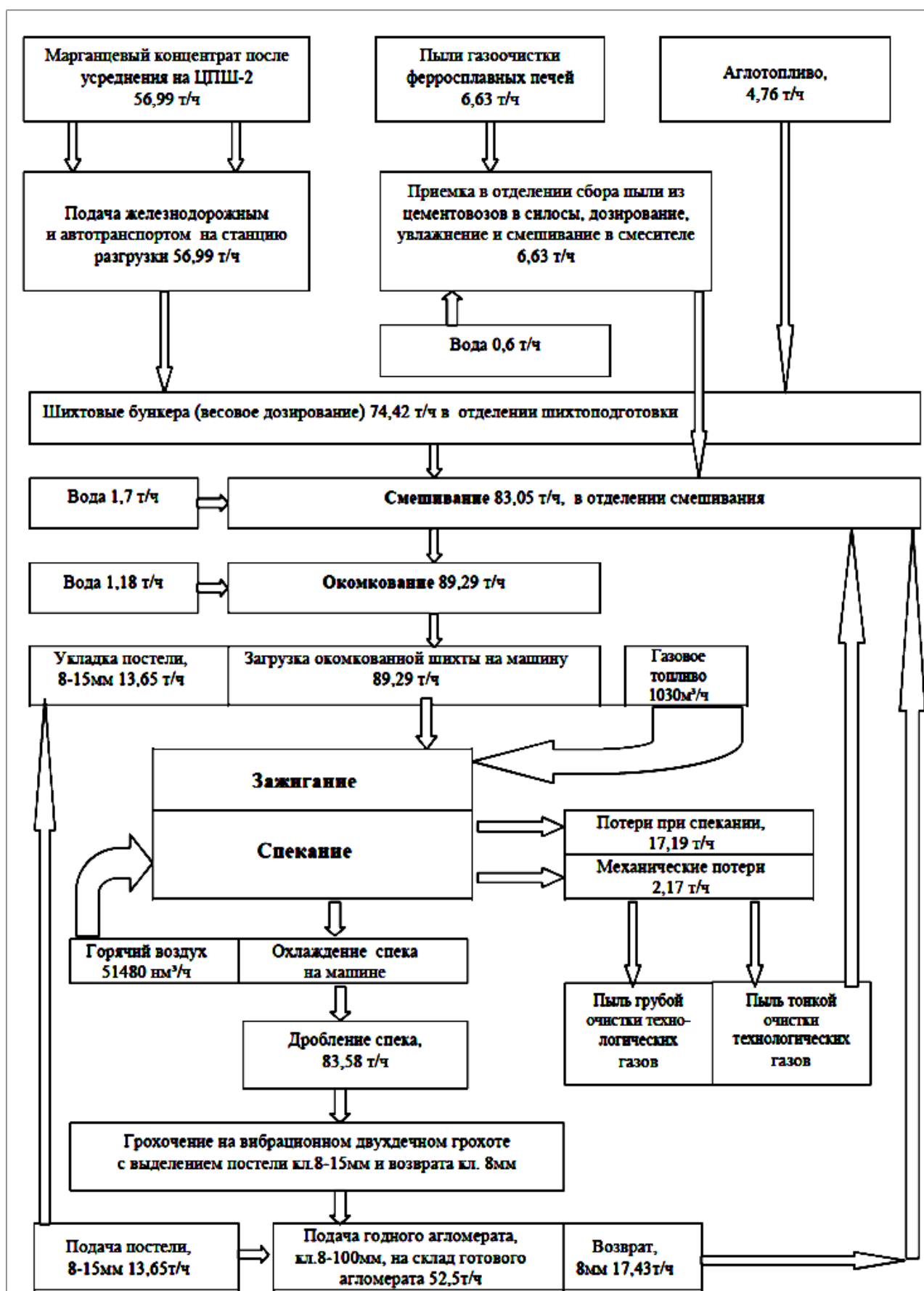


Рисунок 1.1 – Технологическая схема производства неофлюсованного марганцевого агломерата

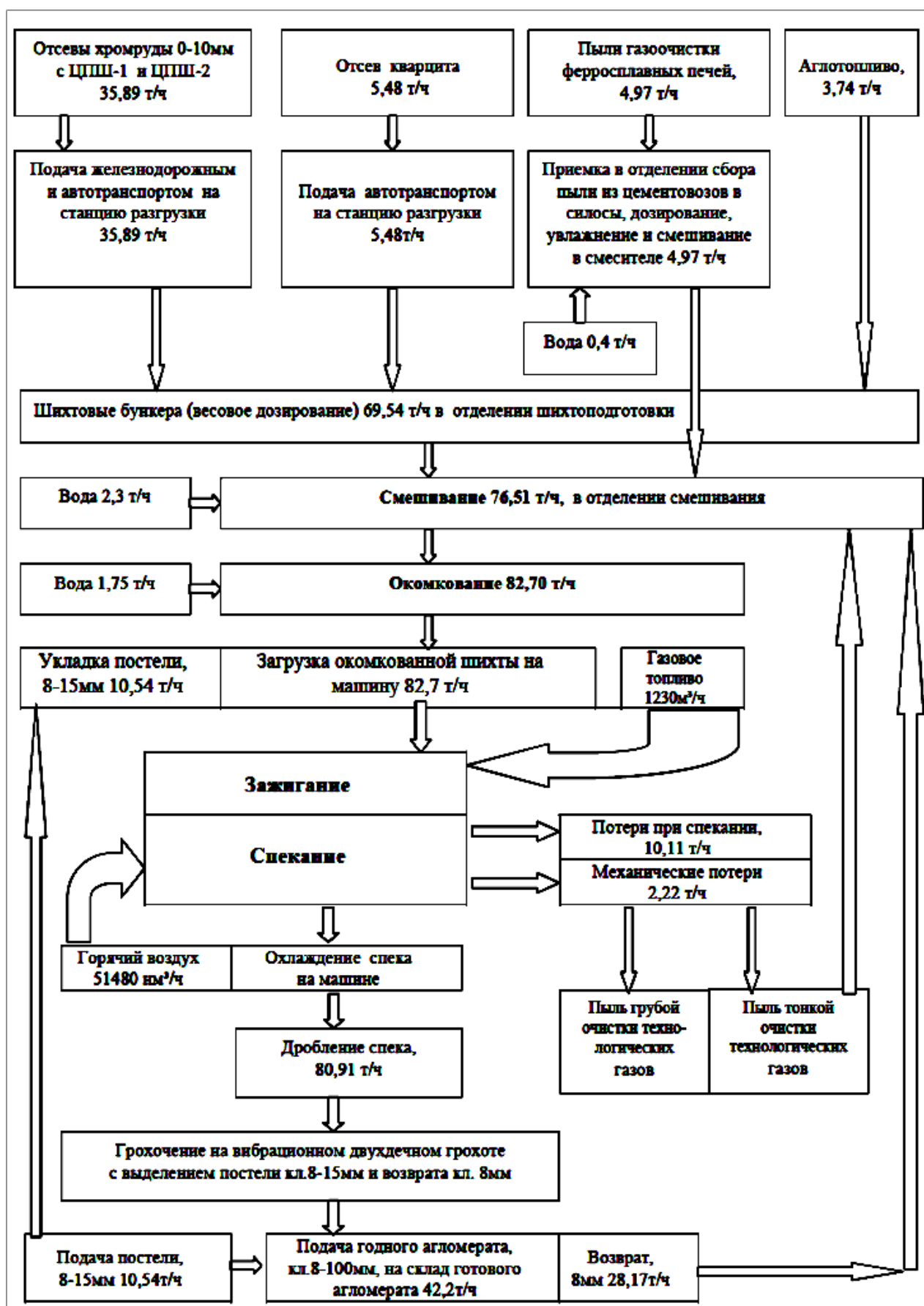


Рисунок 1.2 – Технологическая схема производства хромового агломерата

1.2 Использование ВЭР металлургического производства

Многие отрасли народного хозяйства располагают значительным резервом топливных и тепловых ВЭР, занимающих значительное место в их топливно-энергетическом балансе. Наибольшими тепловыми ВЭР располагают предприятия черной и цветной металлургии, химической, нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности, промышленности строительных материалов, газовой промышленности, тяжелого машиностроения [1].

Именно в этих отраслях широко используется теплота высокого, среднего и низкого потенциалов. Из почти 90 % теплоты высокого потенциала ($> 623 \text{ K}$): около 33 % идет на плавку, 40 % – на нагрев и около 20 % – на обжиг руд и минерального сырья. Большая часть теплоты высокого потенциала обеспечивается за счет сжигания различных видов топлива непосредственно в технологических установках.

Теплота среднего ($373 - 622 \text{ K}$) и низкого ($323 - 423 \text{ K}$) потенциала применяется для теплоснабжения потребителей, требующих повышенных значений температуры и давления.

Использование вторичных энергоресурсов, неизбежно возникающих в различных технологических процессах, является одним из существенных резервов энергосбережения. Выход вторичных энергоресурсов зависит от целого ряда факторов: параметров, при которых протекает процесс, его режима, конструктивного исполнения технологического оборудования и др. В общем случае суточный (и сезонный) выход ВЭР характеризуется значительной неравномерностью. Поэтому различают показатели удельного и общего выхода ВЭР – максимальный, средний и минимальный (гарантированный), как в суточном, так и сезонном разрезе. В любом случае утилизации ВЭР эффективность их использования определяется достигаемой экономией первичного топлива и обеспечиваемой за счёт этого экономией затрат на добычу, транспортирование и распределения топлива (энергии). Поэтому важное условие экономической эффективности ВЭР – правильное определение вида и количества топлива, которое экономится при их утилизации.

Каждая технологическая установка характеризуется определенным энергетическим КПД, показывающим, какая величина подведенной к процессу энергии теряется. На практике происходит постоянная борьба с потерями, используются самые различные способы их сокращения, в том числе организационно-технические, связанные с наладкой технологических процессов и режимов работы агрегатов, улучшением изоляции технологического оборудования, трубопроводов горячей воды, пара и пр.

Один из путей снижения потерь – использование возможности возвращения части потерь энергии непосредственно в тот процесс, в котором они образуются. Многочисленные исследования подтверждают энергетическую и экономическую эффективность регенерации и рекуперации энергии. После этого остаются только потери, которые по данной технологии при

существующем уровне развития техники уменьшить и избежать нельзя. Эту часть энергетических потерь и принято считать вторичными энергоресурсами, которые обычно подразделяют на горючие, тепловые и избыточного давления.

В целом следует заметить, что использование ВЭР во многих случаях экономически эффективно, поскольку удельные капитальные вложения в установку по утилизации тепловых ВЭР, отнесенные к 1 т сэкономленного топлива, ниже, чем цена топлива с учетом его транспортировки. Поэтому важное значение имеют планирование и стимулирование использования ВЭР.

Для наиболее полного выявления и эффективного использования ВЭР на каждом действующем предприятии, в объединении при разработке паспорта предприятия обеспечивается учет всех образующихся ВЭР, возможных направлений использования и способов их утилизации. Все включаемые в план мероприятия по повышению уровня использования ВЭР должны быть экономически обоснованы. При ограниченности капиталовложений в первую очередь следует предусматривать мероприятия, осуществление которых обеспечивает наибольший экономический эффект.

Экономия топлива зависит от направления использования ВЭР и схем топливо- и энергоснабжения предприятия. При тепловом направлении использования ВЭР экономия топлива определяется путём сопоставления количества тепла, полученного от использования ВЭР, с технико-экономическими показателями выработки того же количества и тех же параметров тепла в основных энергетических установках.

При определении экономической эффективности использования ВЭР сопоставляют варианты энергоснабжения, которые удовлетворяют потребности данного производства во всех видах энергии с учётом использования ВЭР, удовлетворяют те же потребности и без учёта использования ВЭР. Основными показателями сопоставимости этих вариантов служат: создание оптимальных (для каждого из вариантов) условий их реализации; обеспечение одинаковой надёжности энергосбережения; достижение необходимых санитарно-гигиенических условий и безопасности труда; наименьшее загрязнение окружающей среды.

Одно из основных направлений повышения эффективности производства и использование энергетических ресурсов в промышленности – увеличение единичной мощности агрегатов, концентрация производства и создание укрупнённых комбинированных технологических процессов. Особенно это эффективно для технологических процессов с большим выходом тепловых ВЭР. Создание крупных комбинированных производств позволяет использовать ВЭР одних процессов для нужд других, входящих в общий комбинированный комплекс [2].

Развитие энерго- и ресурсосберегающих технологий, помимо улучшения экономических и технических показателей работы агрегатов, будут также способствовать снижению экологической нагрузки на окружающую среду. Использование вторичных энергоресурсов стало одной из перспективных энергосберегающих технологий, получивших наиболее широкое развитие.

1.3 Классификация вторичных энергоресурсов

В соответствии с официальным определением, вторичные энергоресурсы – это энергетический потенциал (запас энергии в виде физической теплоты, потенциальной энергии избыточного давления, химической энергии и др.) продукции, отходов, побочных и промежуточных продуктов, которые не могут быть использованы в самом агрегате, но могут частично или полностью применяться для энергоснабжения других потребителей [3].

По виду содержащегося в них энергетического потенциала ВЭР подразделяются на три основных группы:

- горючие;
- тепловые;
- избыточного давления.

Горючие ВЭР – это отходы одного производства, которые могут быть утилизированы непосредственно в виде топлива в других производствах. К ним относятся, например, технологические газы черной и цветной металлургии, жидкие и твердые топливные отходы химической и нефтегазоперерабатывающей промышленности, щепа, опилки, стружка, щелоки деревообрабатывающей и целлюлозно-бумажной отраслей.

Тепловые ВЭР – это физическая теплота отходящих газов, основной и побочной продукции производства, нагретых металла, шлаков и зол, горячей воды и пара, отработанных в технологических установках, системах охлаждения и пр.

Следует отметить, что тепловая энергия отходов, выходящая из технологического агрегата и используемая для подогрева вещественных потоков, поступающих в этот же агрегат (процессы регенерации и рекуперации), ко вторичным энергоресурсам не относятся.

Многие горючие ВЭР, например черной металлургии, имеют низкую теплоту сгорания и химически агрессивны. Это создает значительные трудности при их утилизации. Они же имеют место и при сжигании высококалорийных, но одновременно легко воспламеняемых, взрывоопасных и токсичных ВЭР (водород, сухие абгазы и др.).

Для утилизации горючих вторичных энергетических ресурсов часто необходимо специальное оборудование, однако основной путь их использования – применение в агрегатах промышленных технологий.

Тепловые ВЭР – наиболее распространенный вид энергетических отходов. Их утилизация проводится практически повсеместно. В то же время привлекаются в основном высокопотенциальные (высокотемпературные) тепловые ВЭР. Значительно меньше востребованы среднетемпературные энергетические отходы, низкотемпературные применяются еще реже.

Основное оборудование для использования тепловых ВЭР – котлы-утилизаторы (К/У), системы испарительного охлаждения промышленных печей, различного рода теплообменники, в том числе контактные нагреватели.

По температуре, с которой тепловые ВЭР покидают технологические агрегаты, их делят на высоко-, средне- и низкопотенциальные.

Четкой градации ВЭР по этому признаку нет. Можно принять, что к высокопотенциальным относятся ВЭР, температура которых превышает наименьшую температуру газов в автогенном процессе сжигания топлива (не менее 600°C). К низкопотенциальным принадлежат ВЭР, представляющие собой жидкости с температурой менее 100°C и газы с температурой ниже 300°C [5]. В этом случае среднепотенциальные ВЭР по температуре будут занимать промежуточное положение между высоко- и низкопотенциальными энергетическими отходами.

В целом основными источниками тепловых ВЭР в различных отраслях промышленности выступают технологические агрегаты, как правило, недостаточно совершенные с энергетической стороны.

По мере интеграции в мировую экономику и в связи с перспективой вступления страны в ВТО такое положение приводит к все большей неконкурентоспособности нашей продукции на мировом рынке. Именно поэтому в настоящее время одной из важнейших задач народного хозяйства является всемерное использование ВЭР. Лидируют здесь рассматриваемая далее черная и цветная металлургия, а также некоторые другие секторы материального производства.[4]

1.4 Источники образования вторичных энергоресурсов и способы их утилизации

Эта отрасль промышленности занимает первое место по вовлечению вторичных энергетических ресурсов. Их суммарный выход в пересчете на условное топливо равен 30 – 50 млн т/год при максимально возможном показателе утилизации около 20 млн т.

На долю черной металлургии приходится около 40 % тепловых и до 80 % горючих ВЭР, применяемых в промышленности. Потребности предприятий с полным металлургическим циклом в топливе (без угля для коксования) только на 30 – 40 % покрываются за счет его привоза и на 60 – 70 % – вторичными энергетическими ресурсами. Распределение ВЭР по основным переделам черной металлургии и возможное их использование приведены в таблице 1.1.

К топливным ВЭР черной металлургии относят доменный, ферросплавный и конвертерный газы.

Топливными побочными продуктами металлургического производства являются также коксовый газ, промежуточный продукт углеобогащения и коксовые отсеvy.

Коксовый газ, образующийся в процессе коксования угольной шихты, называют прямым. Выход его составляет 400 – 450 м³/т кокса. После удаления из него смолы и воды, извлечения аммиака и бензольных углеводородов он называется обратным. Обратный коксовый газ используется в качестве топлива.

Доменный газ выделяется при выплавке чугуна. Из-за значительного содержания балласта (N_2 и CO_2) он имеет относительно низкую теплоту сгорания. Основным горючим компонентом газа является CO, что делает газ токсичным и взрывоопасным. Выход газа в среднем составляет 2000 м³/т чугуна.

Таблица 1.1 – Распределение ВЭР по основным переделам черной металлургии

Производство	% к общему по отрасли	% к выходу
Коксохимическое	41,7	90
Доменное	37,0	85
Мартеновское	14,6	60
Прокатное	6,7	40
По отрасли	100	80

Ферросплавный газ образуется при выплавке ферросплавов в электрических печах закрытого типа. Газ содержит 70 – 90 % CO и до 5 % других горючих компонентов, что определяет его высокую теплоту сгорания, порядка 9,7 МДж/м³. Выход газа составляет от 300 до 1350 м³/т сплава. Из-за токсичности ферросплавный газ опасно транспортировать на большие расстояния. В настоящее время этот газ используется не полностью. Его применяют для обжига извести, как топливо в котельных.

Конвертерный газ является побочным продуктом кислородно-конвертерного производства стали. Выход конвертерных газов периодичный, зависит от интенсивности продувки кислородом и емкости конвертера. Содержит до 90 % CO, теплота его сгорания 8,8 МДж/м³. Однако в настоящее время из-за цикличности выхода в Казахстане конвертерный газ не используется.

Несколько иначе обстоит дело с использованием тепловых отходов. Не все и не всякие потери тепла в технологических агрегатах возможно и экономически целесообразно использовать. Наиболее ценными для утилизации тепла являются те теплоносители, которые обладают следующими особенностями:

- непрерывностью поступления;
- высоким температурным потенциалом;
- большой количественной концентрированностью.

К ним относят: тепло готового продукта, тепло отходящих газов, тепло, отводимое при охлаждении элементов печей.

Готовая продукция переделов черной металлургии (кокс, чугун, сталь, прокат, ферросплавы), а также шлаки доменного и сталеплавильного процесса обладают двумя из указанных выше особенностей: температура их составляет

1200 – 1700 °С и доля уносимого физического тепла в балансе агрегатов от 5 до 50 %.

Уходящие газы металлургических печей по возможности утилизации самые ценные тепловые ВЭР. Тепло уходящих газов может быть использовано для нагрева шихты, воздуха, топлива, для получения пара и электроэнергии. Большинство печей оборудовано теплоутилизационными установками: рекуператорами, котлами-утилизаторами и другими установками.

С целью увеличения срока службы отдельные детали печей подвергаются принудительному охлаждению. Потери тепла с охлаждением в ряде случаев составляют 10 – 20 %. Это тепло может быть использовано в системах испарительного охлаждения (СИО), которыми оборудуют мартеновские, доменные, нагревательные, ферросплавные печи. В СИО вырабатывается насыщенный пар давлением до 4 МПа.

Потери тепла с готовым продуктом в черной металлургии характеризуются следующими показателями, ГДж на 1 т продукции: с агломератом 0,63, с коксом (после печи) 1,26, с жидким чугуном 1,05, с жидкой сталью 1,26, с жидким шлаком 0,84, с прокатом 0,5.

Физическое тепло горячих продуктов в общем случае может быть использовано по одному из следующих вариантов:

- регенерация тепла с его возвратом в данный процесс;
- технологическое использование тепла в последующем процессе;
- энергетическое использование тепла.

Для металлургического производства наиболее характерно последующее технологическое использование тепла.

Эффективное использование ВЭР позволяет замещать покупные ТЭР, что значительно снижает энергоемкость и себестоимость продукции. Так, например:

- использование коксового, доменного газа на собственной ТЭЦ позволяет значительно снизить до 2 – 3 раз себестоимость электроэнергии и пара;
- утилизация теплоты при сухом тушении кокса (УСТК) на котлах-утилизаторах с установкой паровых турбин для выработки электроэнергии;
- предварительный подогрев угольной шихты отходящими газами позволяет снизить расход топлива на 70 Мкал на 1 т кокса;
- в доменном производстве утилизация ВЭР позволяет значительно снизить затраты ТЭР на 1 т чугуна (до 3,5 Гкал/т), уровень утилизации на сегодня составляет от 30 до 32 %;
- в электросталеплавильном производстве удельный расход электроэнергии на (15 – 30 %) выше, чем в странах ЕС, что связано с реализацией устаревшей технологии и значительными неиспользованными возможностями по энергосбережению;
- использование доменного или коксового газа в нагревательных печах прокатного производства позволяет существенно снизить расход природного газа и до 20 % снизить себестоимость продукции.

Ежегодно за счет использования тепловых ВЭР экономится до 10 % привозного топлива (природного газа, мазута, угля). Количество тепловой энергии, выработанной за счет утилизации ВЭР, в общем балансе потребления металлургических заводов составляет 30 %, а на некоторых заводах до 70 %. [8].

Агломерационное производство металлургических предприятий располагает значительным количеством неиспользуемых ВЭР или используемых недостаточно.

К ВЭР агломерационного производства относят тепло воздуха, охлаждающего агломерат, и агломерационных газов. Удельная выработка ВЭР при использовании теплоты воздуха, охлаждающего агломерат, составляет по достигнутому за рубежом данным 0,11 Гкал, а при использовании агломерационных газов – примерно 0,035 Гкал на 1 т агломерата. Системы утилизации тепла с выработкой пара и электроэнергии получили широкое применение в Японии и ряде других стран.

В Казахстане таких установок по использованию ВЭР нет. Выполненные Гипромезом разработки системы утилизации тепла воздуха охладителей агломерата для условий Западно-Сибирского металлургического комбината (ЗСМК) показали, что их внедрение позволит полностью обеспечить теплоснабжение агломерационного производства и, кроме того, вырабатывать в час не менее 5 – 8 МВт электроэнергии.

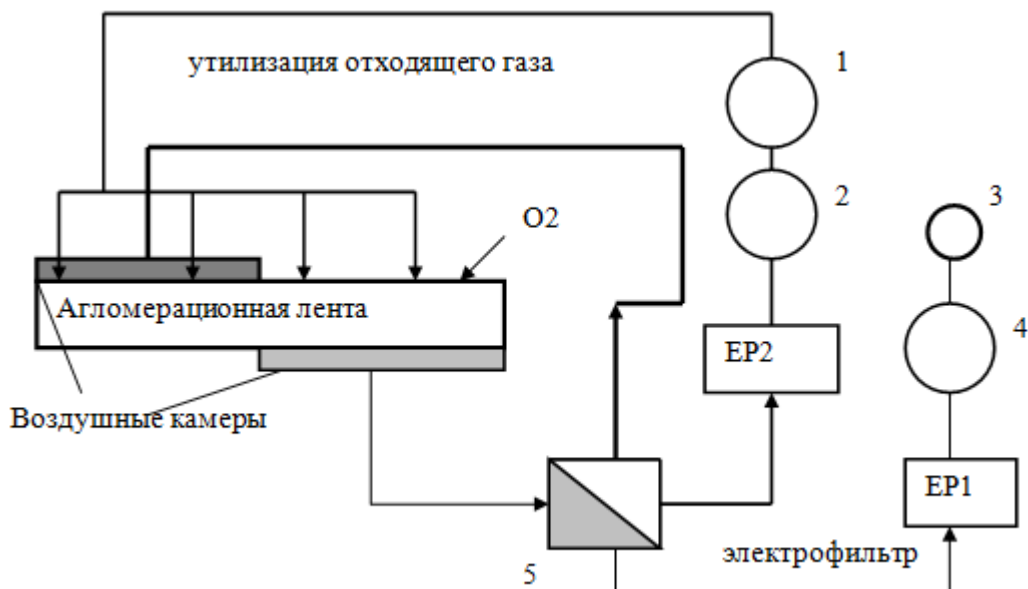
1.5 Современные отечественные и зарубежные технологии повышения энергоэффективности агломерационного процесса и утилизации ВЭР

1.5.1 Система утилизации отходящих газов агломерационной установки

Для обеспечения доменного производства достаточным количеством высококачественного и недорогого сырья фирма Huttenwerke Krupp Mannesmann GmbH (НКМ) разработала новый процесс утилизации отходящих газов агломерационных установок. Новый процесс LEEP (рисунок 1.3) позволит минимизировать количество выбросов в атмосферу и энергопотребление агломерационных установок без снижения качества продукции и производительности оборудования. Оборудование для реализации агломерационного процесса LEEP было установлено на агломерационной установке фирмы НКМ в 2001 г. С декабря 2001 г. система находится в постоянной эксплуатации.

Из-за характера протекания процесса агломерации концентрация различных компонентов в отходящих газах отличается по длине агломерационной ленты. На первой стадии процесса происходит, главным образом, удаление из железорудной шихты воды. Вторая стадия характеризуется повышенной концентрацией оксидов серы, хлористых соединений, диоксинов/фуранов.

Количество выделяемого монооксида и двуокиси углерода, а также оксидов азота распределено равномерно по всей длине агломерационной ленты. После удаления воды на первой стадии агломерационного процесса происходит повышение температуры отходящих газов на второй стадии до максимально возможного значения в зоне окончательного спекания агломерационного слоя.



1 – вторичный вентилятор, 2 – главный вентилятор, 3 – выводящая труба, 4 – главный вентилятор, 5 – теплообменник

Рисунок 1.3 – Схема процесса LEEP

В отличие от других процессов утилизации отходящих газов процесс LEEP позволяет собрать все отходящие газы на второй стадии и рециркулировать их в систему для последующего использования на всей длине агломерационной ленты. Необходимый для горения кислород – это в основном остаточный кислород отходящих газов. При рециркуляции отходящих газов пыль отфильтровывается в агломерационный слой, оксиды азота и диоксины/фураны частично разрушаются, оксиды серы, а также сернистые соединения абсорбируются. Монооксид углерода в рециклируемом газе (в результате окисления при горении) и физическое тепло могут использоваться для последующего нагрева, что позволяет уменьшить энергопотребление от внешних источников агломерационного процесса.

Благодаря рециркуляции отходящих газов второй стадии процесса на выброс в атмосферу поступает газ первой стадии, содержащий вредные соединения в меньшей концентрации. Это обеспечивает значительное снижение количества отходящих газов и вредных выбросов. Концентрация вредных соединений определяется абсорбционной и окислительной способностью агломерационного слоя.

Оборудование. Площадь зоны всасывания агломерационной установки фирмы НКМ составляет 420 м². Имеются два расположенных параллельно агломерационной ленте основных трубопровода отходящих газов. Для разделения двух отводящих зон была установлена перегородка с целью полного отделения магистрального трубопровода отходящих газов от зон, расположенных в конце агломерационной ленты, что обеспечивает отвод отходящих газов только с ее первой половины. Заслонки отделяют воздушные камеры переднего участка ленты от второго магистрального трубопровода отходящих газов, это обеспечивает отвод газов только из зон, расположенных в конце ленты. Из-за возможности изменения параметров технологического процесса четыре воздушные камеры (всего 29) в середине агломерационной ленты могут при необходимости подключаться к циркулирующей или отводящей магистрали.

Перед поступлением обоих газовых потоков в один из электрофильтров они проходят через теплообменник. Выравнивание температур газовых потоков (перед теплообменником – 200/165 °С, после теплообменника – 150/115 °С) позволяет эксплуатировать существующие вентиляторы отходящих газов при том же самом значении температур, как и при традиционном агломерационном процессе. Кроме того, перед теплообменником в зоне, в которой холодный газ переднего участка ленты достигает температуры точки росы, расположены газовые трубы. Уровень температур во всех дополнительных газовых трубах превышает точку росы кислот. Охлаждение горячих газов, циркулирующих с температурой около 150 °С, гарантирует, что свойства агломерата не ухудшатся.

После прохождения потока отходящих газов через электрофильтры и вентиляторы циркулирующий технологический газ подается обратно на агломерационную ленту через дополнительный вентилятор с контролируемым уровнем скорости. Отходящие газы с первого участка агломерационной ленты выводятся в атмосферу через выводную трубу.

Все 12 вытяжных кожухов предназначены для подачи циркулирующего газа обратно на агломерационную ленту, которая полностью закрыта кожухами по всей длине, начиная с зоны зажигания и заканчивая выходным участком. Последний кожух можно снимать для проведения операции замены паллет. Фирма НКМ разработала систему герметизации между паллетами и кожухом. Регулируя положение перегородки между циркулирующим и отходящим потоками газов и тем самым изменяя подачу газа, можно создавать отрицательное давление в кожухах. Процесс распределения газа вдоль агломерационной ленты можно оптимизировать путем использования клапанов, установленных в газовых трубах перед кожухами.

Средняя производительность агломерационной установки находится на уровне 4,4 млн. т агломерата в год. Все качественные показатели агломерата остались неизменными за счет увеличения фракционного размера с 5,3 до 6,3 мм при сохранении на стабильном уровне доли мелкой фракции (< 10 мм), которая не превышает 25 %. Доля фракции размером < 5 мм составляет менее

3,25 %. Восстановимость агломерата в соответствии с испытаниями ISO 4692 снизилась примерно на 0,2 %/мин. Прочностные показатели сопоставимы со значениями, полученными при традиционном процессе агломерации, и находятся на достаточно высоком уровне – примерно 78 %.

Общее сокращение энергопотребления составляет 213 МДж на 1 т агломерата, или на 12,5 %.

Количество образующихся отходящих газов при процессе LEEP составляет только 50 %, или 650 тыс. м³/ч по сравнению с традиционным процессом агломерации (1,3 млн. м³/ч). Количество выбросов было уменьшено более или менее на 50 % в зависимости от соединения (таблица 1.2) Сокращение количества выбросов SO₂ составило примерно 35 %, диоксинов – на уровне 80 %.

Таблица 1.2 – Сравнительный анализ выбросов традиционного агломерационного процесса и процесса LEEP

Отходящий газ	Традиционный процесс	Процесс LEEP	Сокращение, %
Объем, тыс м ³ /ч	1300	650	50
Пыль, мг/м ³	50	25	35
SO ₂ , мг/м ³	500	325	50
NO _x , мг/м ³	400	200	50
CO, г/м ³	12	6	50
HCl, мг/м ³	30	15	50
HF, мг/м ³	5	2,5	50
PCDF/D, нг/м ³	1,5	0,3	80

Компания Siemens VAI разрабатывает и внедряет инновационные технологии, позволяющие сократить объём выбросов агломерационного производства до самых низких уровней в истории производства. Центральную роль в этом контексте играет система селективной рециркуляции отходящих газов: газы, улавливаемые в четко определенных зонах агломашины, смешиваются с отходящим воздухом от охладителя и возвращается на агломерационную ленту (рисунок 1.2).

Система была разработана, главным образом, для поддержания объема отходящих газов на постоянном уровне при одновременном повышении производительности агломерационного оборудования и сокращении удельного количества выбросов в атмосферу. Данный подход гарантирует сохранение в приемлемых пределах инвестиционных и эксплуатационных затрат, связанных с внедрением и разработкой систем газоочистки. Система может быть установлена как на действующих, так и на вновь сооружаемых установках с одновременным повышением или без повышения производственной мощности.

Основные преимущества:

- Сокращение объемов отходящих газов до 50%;
- Снижение удельного расхода твердого топлива до 10%;
- Более низкие инвестиционные затраты и расходы на эксплуатацию системы газоочистки;
- Стабильная, высокая производительность установки и качества агломерата;
- Сокращение выбросов CO_2 ;
- Уменьшение удельного количества выбросов оксидов серы и азота;
- PCDD/PCDF (диоксинов/фуранов) и тяжелых металлов.

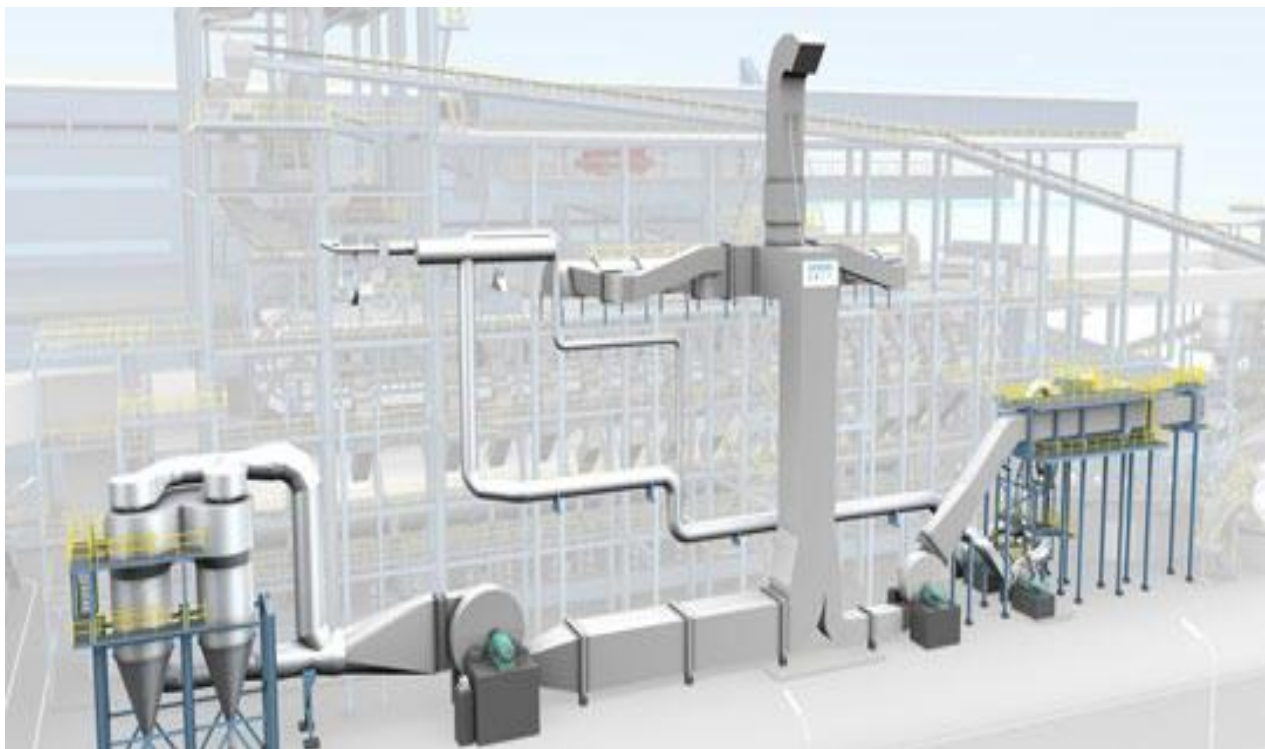


Рисунок 1.4 – Система селективной рециркуляции отходящих газов

1.5.2 Агломерационный процесс с тепловой точки зрения

Отдозированные в заданном, заранее рассчитанном соотношении компоненты перемешивают, увлажняют (для улучшения окомкования) и после окомкования без уплотнения загружают на колосниковую решетку слоем 300–400 мм. Затем включают нагнетатель – вентилятор, работающий на отсос. Под колосниковой решеткой создается разрежение, благодаря которому в слой вначале засасывается поток горячих горновых газов, обеспечивающих «зажигание» шихты, т. е. нагрев поверхностного слоя примерно до 1200 °С (в течение 1,5 – 2,0 мин). Поступающий затем в слой в остальное время, процесса атмосферный воздух обеспечивает интенсивное горение частиц кокса шихты. В зоне максимальных температур (1400 – 1450 °С) происходит частичное плавление рудных зерен, их слипание, а затем в ходе последующей кристаллизации образуется пористая структура – агломерационный спек [17].

В каждый момент времени происходит воспламенение нагретых до 700 – 800 °С частичек топлива в слое шихты, примыкающем к нижней границе зоны горения. Одновременно заканчивается горение частиц топлива на верхней границе зоны горения.

Структура агломерируемого слоя, сущность протекающих в отдельных зонах процессов могут быть определены более детально в соответствии с рисунком 1.5, на котором представлены результаты прерванного примерно на середине спекания.

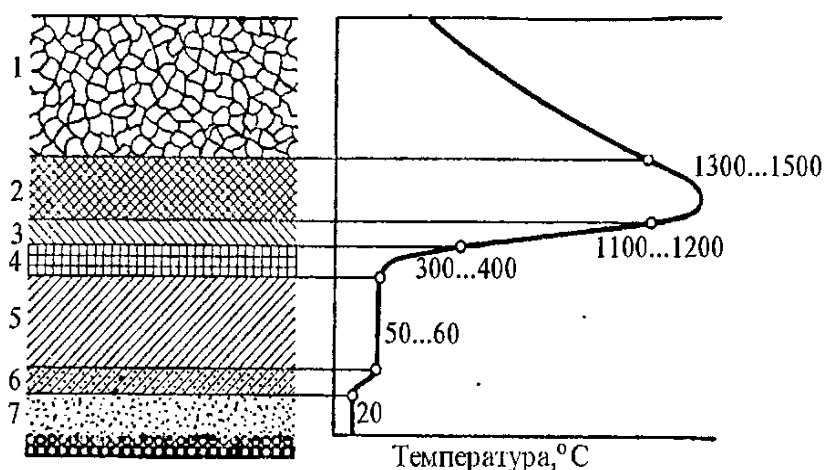


Рисунок 1.5 – Структура агломерируемого слоя и распределение температур в отдельных его зонах

Как видно, определяющей зоной является горизонт с максимальной температурой – зона плавления – зона формирования агломерата (2). Выше этой зоны находится слой пористого агломерационного спека (1). В расположенной ниже зоне интенсивного нагрева (3) происходит быстрый нагрев спекаемого материала – со скоростью до 800 град/мин. и такое же быстрое охлаждение продуктов горения. Выходя из этой зоны, газ с температурой 300 – 400°C попадает во влажную шихту – образуется зона сушки (4). В этой зоне газ охлаждается до 50 – 60°C и покидает ее насыщенным парами воды. В расположенной ниже холодной шихте (15 – 20°C) газ охлаждается, становится пересыщенным, и часть паров воды в этой зоне конденсации (6) в виде капелек осаждаются на комочках шихты, увеличивая их влагосодержание. Так как скорость движения зоны конденсации в несколько раз больше скорости перемещения по слою зоны сушки, между этими зонами со временем образуется слой переувлажненной шихты (5). При этом быстро уменьшается толщина слоя исходной шихты (7) [18].

«Развертка агломерационного процесса во времени» – по длине машины представлена на рисунке 1.6.

Как видно, общее время агломерации можно разбить на три периода: начальный, когда формируются основные зоны спекаемого слоя (в этот период осуществляется зажигание аглошихты, примерно за это же время происходит

переувлажнение всего слоя шихты); основной период, когда тепловой и газодинамический режимы стабилизировались, и происходит перемещение по слою зон формирования агломерата, интенсивного нагрева, сушки; заключительный, в течение которого последовательно «выклиниваются» все зоны спекаемого слоя, на ленте остается только охлаждающийся агломерационный спек [19].

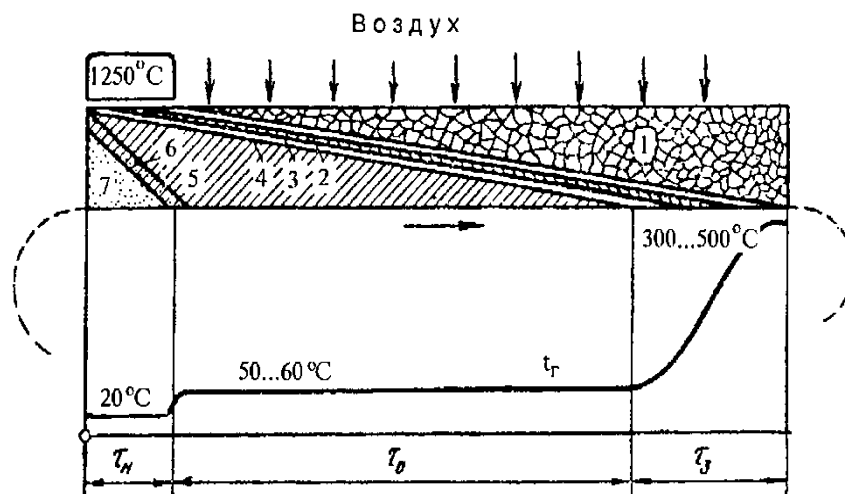


Рисунок 1.6 – Схема расположения отдельных зон в продольном сечении агломерируемого слоя

Процесс считается законченным, когда зона формирования агломерата дойдет до колосников спекательных тележек. При вертикальной скорости спекания 20 мм/мин слой шихты толщиной 300 мм превращается в агломерат за 15 мин.

Современный агломерационный процесс относится к типу слоевых, когда проходящий через слой спекаемых рудных материалов воздух выполняет две главные функции: поставляет кислород для обеспечения горения частичек твердого топлива шихты и осуществляет перенос тепла из одного элементарного слоя в другой. В связи с этим высокие технико-экономические показатели агломерационного процесса могут быть достигнуты только при интенсивном поступлении воздуха в спекаемый слой. Между тем, агломерационные шихты, содержащие пылевидные железорудные концентраты (с размером частиц $< 0,1$ мм) обладают очень высоким газодинамическим сопротивлением. Поэтому обязательной подготовительной операцией является «окомкование» шихт – процесс формирования гранул размером 2 – 8 мм. Слой такой окомкованной, хорошо газопроницаемой, шихты позволяет достичь высоких скоростей движения газового потока (до 0,5 – 0,6 м/с) при относительно небольших перепадах давлений над и под слоем (10 – 15 кПа).

Одной из характерных особенностей агломерации железорудных материалов является интенсивный тепло- и массообмен в слое шихты благодаря ее высокой удельной поверхности (30 – 50 см²/см³). Именно этим объясняется относительно небольшая высота (по 15 – 40 мм) зон плавления,

интенсивного нагрева, сушки, конденсации [20]. Следствием этой особенности процесса является небольшое время пребывания каждого элементарного объема спекаемого материала при высоких температурах – 1,5 – 2,0 мин. Поэтому технологи должны обеспечить такие условия процесса (крупность частиц компонентов шихты, скорость движения газа в слое и др.), чтобы за это небольшое время успели пройти основные химико-минералогические и физические процессы, обеспечивающие получение агломерата требуемого качества: выгорание углерода и серы, диссоциация карбонатов, нагрев рудных частиц до температур плавления, их слипание и др.

Второй особенностью процесса агломерации является возникновение неоднородного температурного поля в объеме спекаемого материала. Из-за точечного распределения частичек топлива в шихте очаги горения-плавления чередуются с участками материала (шихты или спека), находящимися в твердом состоянии. В результате локальной усадки расплавленного материала в очаге горения образуются поры размером 3 – 10 мм. Благодаря этой особенности сохраняется пористая достаточно газопроницаемая структура слоя в зоне существования расплавов. Дополнительные поры возникают при выделении газов от горения углерода, серы, диссоциации карбонатов, восстановления оксидов железа и др.

Третья особенность агломерации заключается в том, что горение частиц топлива в слое происходит в условиях двойной регенерации тепла: воздух, поступающий в зону горения, предварительно подогревается до 1000 – 1100 °С в слое охлаждающегося спека, а топливо (и остальная часть шихты) перед воспламенением нагревается до 700 – 800 °С потоком горячих газов, выходящих из зоны горения. В течение примерно 80 % времени спекания выходящий из слоя газ имеет температуру 50 – 60 °С. Это значит, что основное количество тепла от зажигания и горения углерода твердого топлива шихты остается внутри слоя и участвует в теплообменных процессах [21].

Еще одна положительная особенность агломерации железорудных материалов состоит в том, что в результате частичного восстановления оксидов марганца или хрома в зоне умеренных температур значительно снижаются температуры плавления таких восстановленных материалов – на 150 – 200 °С, благодаря чему существенно сокращается потребность в тепле на процесс – это позволяет снизить содержание топлива в шихте при сохранении достаточно высокой прочности агломерата. Указанное выше делает агломерацию методом просасывания исключительно эффективным процессом с точки зрения теплотехнических показателей: при содержании углерода в шихте всего 3 – 5 % удается нагревать спекаемый материал до 1400 – 1450 °С.

1.5.3 Исследование теплообменных процессов при агломерации

Горение коксовой мелочи при агломерации протекает в чрезвычайно узкой по высоте зоне. В зависимости от крупности топлива ее толщина может меняться в пределах от 10 (размером <1 мм коксовой мелочи) до 40 мм (фракция <10 мм). При работе на коксовой мелочи фракции <3 мм можно

считать в большинстве случаев толщину зоны горения равной 20—25 мм. Процесс агломерации в целом проводится при значительном избытке воздуха ($\alpha = 1,5-2,0$), но часть воздуха проходит зону горения, не соприкасаясь с горящими частицами топлива. Вследствие этого при нормальном расходе коксовой мелочи выходящие из спекаемого слоя газы содержат 3—4% O_2 . При агломерации твердое топливо горит до CO_2 и CO . При нормальном расходе топлива $CO_2:CO$ - 4-5, но может значительно снижаться с увеличением расхода углерода. Так, при 8-12% коксовой мелочи в шихте оно составляет 3 - 2, а при производстве металлизированного агломерата 2 - 3 (до 25% коксовой мелочи в шихте). При этом сказываются возрастающая потребность в кислороде и повышение температуры в зоне горения, способствующее сгоранию углерода до монооксида углерода.

По данным Ф. Каппеля, Г. Вендеборна, 1973 г. Анализ отходящих газов позволяет рассчитать баланс кислорода при спекании шихт различного типа. Отходящие газы содержат свободный кислород (O_2), CO_2 и CO . Если исключить вредные подсосы, то сумма $O_2 + CO_2 + 0,5CO$ должна быть приблизительно равна 21%, т. е. содержанию кислорода в воздухе. В действительности при спекании гематитов, мартитов, бурых железняков эта сумма составляет 23 – 27%. Дело в том, что коксовая мелочь сгорает в кислороде шихты, который при восстановлении последней присоединяется к газу. В случае агломерации магнетитовых руд и концентратов с низким расходом топлива происходит частичное окисление магнетита шихты до гематита, на что затрачивается кислород воздуха, всасываемого в слой

Величина суммы $O_2 + CO_2 + 0,5CO$ снижается при этом до 18,5 – 20%. В первом случае характер агломерации восстановительный, а во втором — окислительный. Существует два возможных режима агломерации, в каждом из которых общая скорость движения зоны высоких температур лимитируется различными факторами. При спекании со средним и высоким расходами (в среднем >6% коксовой мелочи в шихте) общая скорость движения зоны горения определяется исключительно скоростью горения частиц коксовой мелочи, которая в свою очередь зависит главным образом от количества кислорода, подводимого в единицу времени к зоне горения твердого топлива. В этом режиме частицы коксовой мелочи, расположенные под зоной горения, не горят, так как зона горения поглощает почти весь кислород воздуха, просасываемого через слой. Из-за нехватки кислорода эти коксовые частицы не могут гореть даже в том случае, если они раскалены до температуры, превышающей температуру их воспламенения. При агломерации с низким расходом коксовой мелочи (<6%) общая скорость движения зоны высоких температур определяется скоростью теплообмена под зоной горения. При этом частицы коксовой мелочи под зоной горения получают достаточное количество кислорода, но не горят, так как не нагреты до температуры воспламенения.

Вертикальную скорость спекания (v , мм/мин) в этом случае вычисляют по формуле Н. М. Бабушкина и В. Н. Тимофеева:

$$v = KW_0C_g/C_{ш}, \quad (1.1)$$

где K - коэффициент пропорциональности;

W_0 - скорость фильтрации газов в спекаемом слое, м/мин;

C_g - теплоемкость газа, кДж/(м³·К);

$C_{ш}$ - кажущаяся объемная теплоемкость шихты кДж/(м³·К), т. е. количество тепла, которое надо затратить для нагрева 1 м³ шихты на 1 °С при одновременной компенсации затрат тепла по всем происходящим в шихте эндотермическим процессам (испарение воды, разложение части гидратов и карбонатов) и с учетом выделения тепла по экзотермическим реакциям (реакция между твердыми фазами).

Анализ этой формулы показал, что прогрев шихты под зоной горения ускоряется при спекании шихт, не содержащих гидратов и карбонатов, а также с увеличением количества просасываемого через слой воздуха. Таким образом, при любом режиме количество воздуха, подводимого к зоне горения, существенно влияет на вертикальную скорость спекания.

Рассмотрим теперь характерную форму температурных кривых при агломерации. Под зоной горения твердого топлива (нижняя ступень теплообмена) отходящие газы проходят между комками сырой шихты с большой кажущейся теплоемкостью. При огромной поверхности теплообмена в этих условиях отходящие газы на пути в 25 – 40 мм охлаждаются до 40 – 60 °С. Таким образом, теплообмен в нижней ступени оказывается полностью завершенным. Лишь в конце спекания, когда зона горения твердого топлива подходит к постели, т. е. когда не остается сырой шихты, температура отходящих газов под колосниковой решеткой начинает быстро возрастать. Последующее падение температуры отходящих газов под решеткой свидетельствует о прекращении горения углерода и служит сигналом к окончанию спекания. Регулируя скорость движения паллет, можно с помощью автоматически действующей системы обеспечить постоянное положение температурного максимума по длине ленты (например, на последней или предпоследней вакуум-камерах), что предотвращает недопек шихты.

Выше зоны горения (верхняя ступень теплообмена) всасываемый в слой воздух нагревается готовым агломератом. Воздух вносит это так называемое «регенерированное» тепло в зону горения, подогреваясь до 200—900 °С в зависимости от толщины слоя готового агломерата. После зажигания, когда слой агломерата еще тонок, воздух почти не подогревается, регенерация тепла отсутствует. Как показали расчеты и эксперименты, при последующем опускании зоны горения твердого топлива роль регенерированного тепла в тепловом балансе зоны горения возрастает. При толщине слоя готового агломерата 180 – 200 мм и более регенерированное тепло составляет до 50-55% общего прихода тепла в зоне горения. Следствием этого при одинаковом содержании коксовой мелочи по высоте спекаемого слоя является значительное повышение температуры в зоне горения твердого топлива по мере ее движения к колосниковой решетке.

Регенерация тепла значительно повышает тепловой к. п. д. агломерации, снижает расход коксовой мелочи и улучшает качество агломерата. С этой точки зрения выгодно спекать шихту, если это позволяет ее газопроницаемость, в высоком слое (до 450 – 500 мм). Уровень регенерации тепла, приход тепла в средних и нижних горизонтах спекаемого слоя будет при этом особенно высок, что обеспечит получение качественного агломерата при минимальном расходе кокса.

Поскольку поверхность пор пирога агломерата не столь велика, как поверхность комков шихты, теплообмен в верхней ступени оказывается незавершенным. Средняя температура пирога агломерата на сходе с ленты близка к 600 °С. Окончательное его охлаждение ведут на специальных охладителях после дробления и отделения возврата. Температура агломерационного процесса растет с увеличением расхода твердого топлива на спекание, но он зависит также и от теплопотребности шихты. Кроме того, температура в зоне горения меняется при движении этой зоны к колосниковой решетке.

На рисунке кривая ABC показывает реальное распределение температур по высоте спекаемого слоя. В верхней части слоя из-за отсутствия регенерации тепла ощущается его нехватка. Температура в зоне горения здесь низка, прочность агломерата неудовлетворительна. В нижней части слоя температуры настолько высоки и приход тепла так велик, что получается переплавленный агломерат, прочность которого высока, а восстановимость понижена. Для получения пирога агломерата с одинаковыми оптимальными свойствами желательно иметь одинаковые температуры в зоне горения в течение всего процесса спекания (1250 – 1350 °С). Для выхода на этот режим спекания необходимо устранить нехватку тепла и низкие температуры (ДАЕВ), а также избыток тепла и слишком высокие температуры (is.BCD).

Схематическая диаграмма изменения максимальных температур $t_{\max}$ по высоте спекаемого слоя h при движении зоны горения сверху вниз (ABC) и оптимальный температурный режим (EBD) (рисунок 1.7).

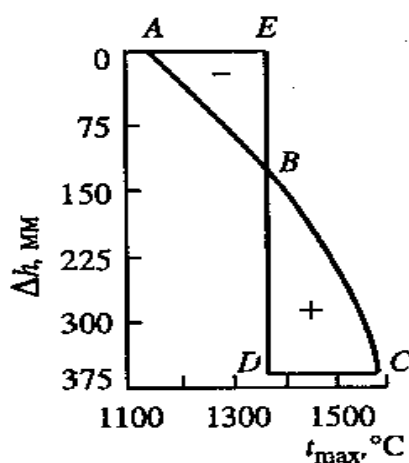
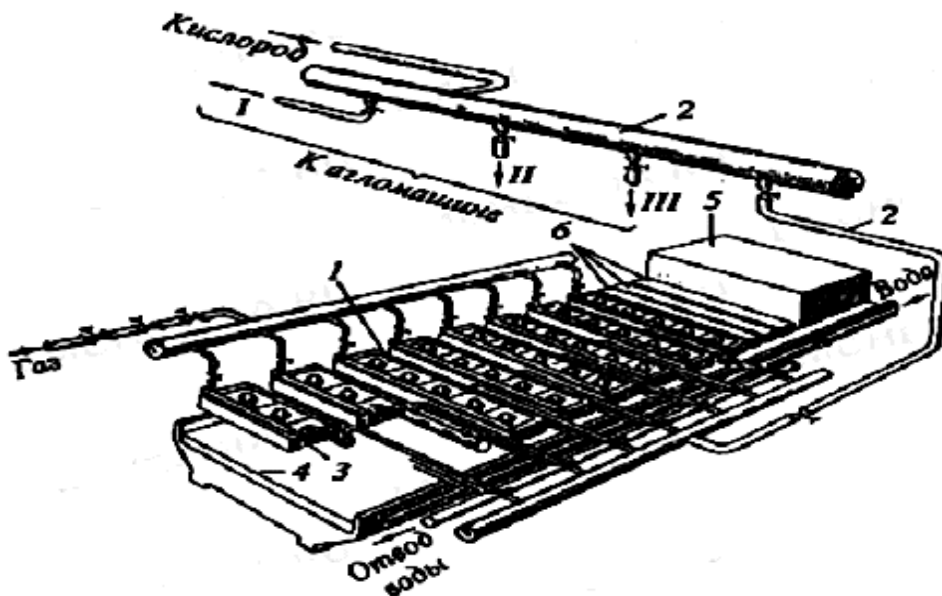


Рисунок 1.7 – Температура различных слоев шихты на агломерационной ленте площадью спекания 50 м²

Вторую из поставленных задач решают методом двухслойного спекания шихт, предложенным Х.Г. Торкульфом в 1911 г. (Швеция). По этому методу на ленту двумя питателями последовательно укладывают две шихты, из которых нижняя содержит на 1—1,5% коксовой мелочи меньше, чем верхняя. После зажигания шихты зона горения движется последовательно через два слоя. В связи с уменьшением расхода углерода в нижнем слое шихты температура и приход тепла снижаются здесь до нормального уровня (устранение ABCD), а изменение температур в зоне горения описывается ломаной линией ABC. Двухслойное спекание (общая высота двух слоев до 400 мм) применяли на Новолипецком, Западно-Сибирском и Карагандинском металлургических комбинатах, а также на Качканарской аглофабрике. Эта технология позволяет экономить 10% коксовой мелочи при улучшении качества пирога агломерата.

При укладке агломерационной шихты на машину происходит сегрегация по содержанию углерода и крупности. В частности, более легкая коксовая мелочь в большой мере концентрируется в средних и верхних горизонтах спекаемого слоя. Содержание углерода в зоне шихты, прилегающей к колосниковой решетке, оказывается пониженным, что позволяет в какой-то мере приблизиться к идеальному распределению температур при спекании. Таким образом, сегрегация шихты при укладке на ленту в определенных пределах является желательной и должна учитываться при обработке оптимального теплового режима агломерации. Нехватку регенерируемого тепла в верхней части спекаемого слоя можно компенсировать подачей к слою нагретого в кауперах (или специальными газовыми горелками) воздуха по методу дополнительного обогрева спекаемого слоя, предложенному В. Шумахером (рисунок 1.8).



1 - газовые горелки; 2 - подвод сжатого воздуха и кислорода к горелкам;
3 — кирпичные подвесные своды; 4 — паллеты с шихтой; 5 — горн; 6 — экраны

Рисунок 1.8 - Установка горелок дополнительного обогрева спекаемого слоя на Енакиевской аглофобрике

За зажигательным горном над лентой устанавливаются дополнительные газовые горелки, которые нагревают воздух перед входом в спекаемый слой до 1000 – 1100 °С. Такая технология позволяет, с одной стороны, увеличить приход тепла в верхних зонах спекаемого слоя, перейти к температурной кривой ЕВС, улучшить качество агломерата, т. е. снизить количество возврата, что могло бы увеличить производительность установки. Но, с другой стороны, газовые горелки требуют значительного количества кислорода воздуха, в связи с тем, что концентрация кислорода во всасываемом в слой газе уменьшается и горение коксовой мелочи в слое замедляется.

В зону дополнительного обогрева целесообразно в данном случае вводить кислород или сжатый воздух. При использовании дополнительных газовых горелок, установленных над первой третью длины ленты, удастся сохранить производительность машины на постоянном уровне, значительно улучшая качество спека. Резкое увеличение расхода газа на горелки позволяет заменить до 25% твердого топлива газообразным (спекание на комбинированном топливе), что представляет большой практический интерес в связи с дефицитом коксовой мелочи. На рисунке показана конструкция наиболее современного комбинированного горна с двумя рядами торцевых горелок. Первый из них эксплуатируют при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,1$, что дает максимальную температуру зажигания 1250 – 1300 °С. Второй ряд горелок работает при $\alpha = 2,0 - 2,5$, что дает возможность эффективного дополнительного обогрева при 1050 – 1100 °С при достаточно высокой концентрации кислорода во всасываемых в слой газах.

Переходя к структуре теплового баланса процесса агломерации (рисунок 1.9), отметим, что в производственных условиях от 60 до 90% всего прихода тепла связано с горением углерода в CO_2 и CO , а также с горением сульфидов.

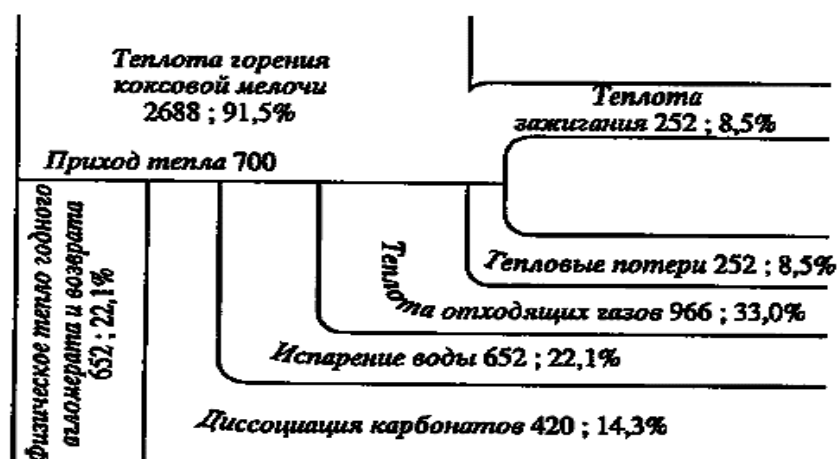


Рисунок 1.9 – Тепловой баланс спекания агломерата (МДж/т агломерата)

Зажигательным горном и дополнительными газовыми горелками слою поставляется 7 – 15% тепла; 1 – 3% тепла вводится нагретой перед спеканием до 50 – 70 °С шихтой и 1 – 5% тепла выделяется в процессе экзотермических

реакций между твердыми компонентами шихты. От 20 до 40% расхода тепла составляет энтальпия готового пирога агломерата.

По данным Дж. Астье, Дж. Жиро, 1955 г На тепловые потери приходится 7 – 10%, остальное тепло расходуется на эндотермические процессы. Тепловой к.п.д. процесса агломерации близок к 75 – 80%. Структура теплового баланса спекаемого слоя (без учета теплоты диссоциации оксидов) показана на рисунке.

1.6 Зажигательный горн

В связи с актуальностью проблемы, а также в связи с резким удорожанием энергетических ресурсов, возникает настоятельная необходимость разработки и внедрения мероприятий по экономии твердого и газообразного топлива, электроэнергии при производстве агломерата.

Целью исследования являлось обобщение имеющегося опыта и научных достижений с дальнейшей разработкой конкретных мероприятий по уменьшению тепло- и энергозатрат (при обеспечении требований к качеству продукции).

Недостаточная изученность вопроса разработки и обоснования конкретных требований к зажигательному горну приводит к тому, что существующие методики не позволяют установить единый, общепризнанный подход к разработке параметров горна (по установлению связи между свойствами шихты, условиями эксплуатации и теплотехническими характеристиками ЗГ).

На основе данных усовершенствованной математической модели тепло- и массообмена и проведенного анализа российского и зарубежного опыта эксплуатации зажигательных горнов сформулированы конкретные требования к работе зоны зажигания:

- прогрев верхней части слоя должен осуществляться на глубину 11 мм до температуры плавления шихты (индивидуальной для каждой шихты).
- необходимо обеспечивать в верхней части слоя количество расплава в пределах 30-50 %.
- необходимо обеспечивать минимальные потери тепла в зоне.

Разработанная теплотехническая модель нагрева поверхностного участка слоя позволяет определять длину зоны зажигания в зависимости от температуры зажигания, скорости движения тележек, скорости фильтрации и содержания углерода в шихте и стабилизировать процесс спекания на заданном уровне. Для упрощения этого анализа построены соответствующие номограммы.

Выбор той или иной конструкции горна зависит от того, насколько удачно вписывается та или иная конструкция в существующие "рамки" агломашины и условий её работы, от выбранного температурного режима горна, состава газа и газопроницаемости шихты и др. Например, короткий горн с высокой интенсивностью зажигания, используемый на аглофабриках Японии, можно рассматривать как один из многочисленных вариантов зажигательных

горнов, целесообразность применения которого повышается с ростом крупности шихты.

Выбор рабочей температуры зоны предварительного нагрева зависит от крупности шихты.

Время, необходимое для "догорания" углерода после выхода из зоны зажигания, в основном, определяет длину зоны дополнительного нагрева или комбинированного нагрева, выбор параметров которых необходимо прорабатывать при выборе тепловой схемы.

Зажигательный горн [ignition hearth] - теплотехническое устройство с системой горелок для нагрева верхнего слоя аглошихты в головной части агломашины до температуры воспламеняемого топлива. Оно устанавливается (стационарно или, с целью облегчения ремонта, на выкатной раме) над спекательными тележками после механизмов загрузки постели и шихты по ходу тележек. Горн представляет собой трех- или четырехсекционную прямоугольную металлоконструкцию, свод, боковые и торцовые стенки которой футерованы огнеупорным кирпичом. По нижнему периметру стенки горна установлены на водоохлаждаемые плиты-холодильники. Внутри горна расположены горелки, к которым подают для сжигания газообразное (топливо и воздух. Воздух подают также непосредственно к спекаемому слою. Интенсивность подачи тепла для зажигания шихты составляет $40 - 60 \text{ МДж/м}^2$ [3]. В последнее время горн выполняют удлиненным: к нему добавляют газогорелочное устройство для введения дополнительного тепла с целью термического упрочнения верхнего слоя агломерата. Для предотвращения нагревания механизмов системы загрузки агломашины от тепла горна его торцовая стенка снабжена водяным экраном.

Нормальное зажигание шихты достигается:

- расходом необходимых количеств газа и воздуха (их соотношением);
- необходимым распределением расхода газа и воздуха по горелкам;
- постоянством массовой доли влаги и углерода в шихте;
- равномерной загрузкой шихты на паллеты.

Экономия топлива на агломашинах возможна по следующим направлениям [5]:

1. использование теплоты горячего агломерата для предварительного подогрева воздуха;

2. использование газовой агломерации, т.е. просасывание через слой шихты смеси ферросплавного газа с воздухом, воспламеняющейся в зоне горения. При этом можно значительно сократить расход коксика;

3. подогрев воздуха в отдельно стоящей камере горения. Цель та же – сокращение расхода коксика;

4. увеличение слоя шихты с одновременным увеличением разрежения под спекательными тележками. Каждые 20 мм увеличения высоты слоя шихты обеспечивают от 0,6 до 1,5 % экономии топлива. Негативное последствие: некоторая потеря производительности агломашины;

5. внедрение малогабаритных зажигательных горнов с низким расходом топлива на зажигание за счет быстрого разогрева поверхностного слоя шихты. Возможно сокращение расхода газа в 2-3 раза.

Зажигательные горны в агломерационных машинах имеют различную конструкцию. Для машин малой мощности используют камерные горны с верхним расположением горелок (рисунок 1.8, а) или с боковыми горелками (рисунок 1.8, б), для машин большой мощности и бескамерных многогорелочные (рисунок 1.10, в). В качестве топлива в зажигательных горнах используют природный, коксовый и коксодоменный газы. При отсутствии газообразного топлива применяют мазут. Температура полного сгорания газообразного топлива около 1600 °С, фактическая значительно ниже.

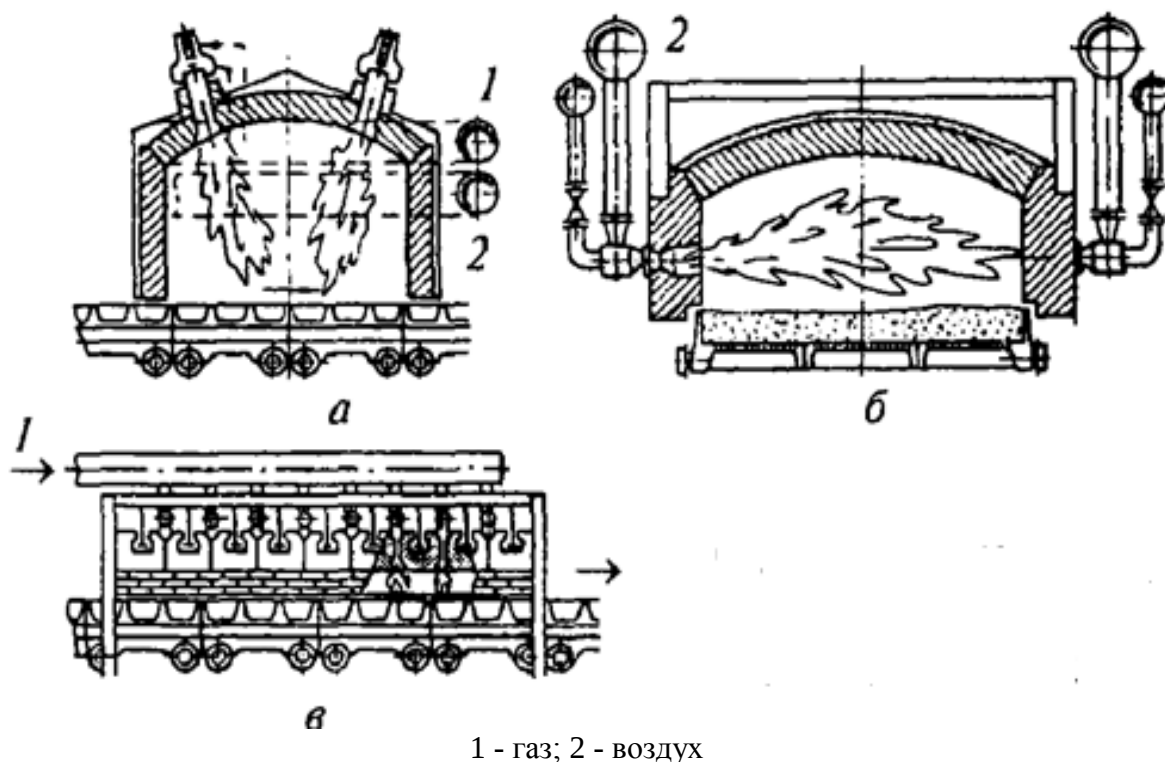


Рисунок 1.10 – Схема конструкции зажигательных горнов

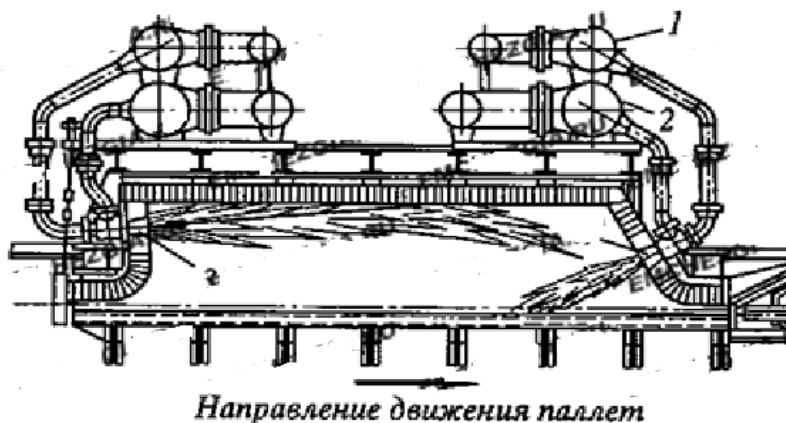
Для футеровки зажигательных горнов обычно применяют высокоглиноземистые (муллитовые и муллитокорундовые) и шамотные изделия с содержанием Al_2O_3 более 30 %. Условия службы футеровки горна характеризуются воздействием преимущественно окислительной газовой среды при температурах до 1350 °С, а также взаимодействием с продуктами пылеуноса дисперсных фракций аглошихты.

Зажигание шихты осуществляется при помощи плоскопламенных горелок. Наименьшую стойкость (3 – 4 мес) имеют шамотные горелочные камни на фосфатной связке. Срок службы сводового муллитового огнеупора несколько выше, чем горелочных камней, однако тоже является недостаточным; этот огнеупор интенсивно скалывается. Стойкость шамотного

огнеупора в стенах горна вследствие менее жестких условий эксплуатации выше (~ 12 мес).

Наиболее быстро разрушаются огнеупоры в средней части горна, в которой развивается максимальная температура (1250 – 1280 °С). В начале горна температура составляет 1100 – 1150°С. Состав газовой среды, %: CO₂ 10 – 14; O₂ 10 – 16; CO 0,2 – 0,5; N₂ 68,2 – 78,8. Возможно воздействие на футеровку пылеобразной коксовой и рудной составляющих шихты. Существенно влияют на стойкость горна в целом и особенно свода резкие перепады температур из-за остановок агломашин на текущие и профилактические ремонты.

Известен зажигательный горн агломерационной машины, установленный над колосниковой решеткой машины, содержащий футерованный корпус, снабженный горелками, установленными в своде корпуса и на его боковых стенках (рисунок 1.11), причем длина горна составляет 0,25 длины колосниковой решетки [7]. Однако указанная длина горна приводит к снижению производительности агломашины по спеку, а свободное расположение горелок снижает стойкость огнеупорной футеровки свода корпуса горна и тем самым сокращает рабочую кампанию агрегата.



1 —подвод газа; 2 — подвод воздуха; 3 — газовые горелки для зажигания; 4 - горелки дополнительного обогрева спекаемого слоя подвесные своды; 4 — паллеты с шихтой; 5 — горн; 6 — экраны

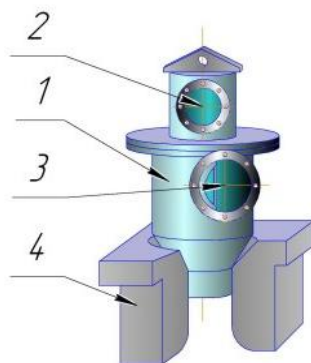
Рисунок 1.11 - Конструкция камерного зажигательного горна с торцевыми горелками

Для увеличения производительности агломерационной машины, улучшения качества агломерата и снижения расхода твердого топлива на спекание шихты в [9] горн агломерационной машины, установленный над колосниковой решеткой с уложенным на ней слоем шихты, содержащий футерованный прямоугольный корпус с расположенными рядами 8 его боковых стенках горелками, снабжен горелочными камнями с коническим отверстием, угол раскрытия которого составляет 25 – 45°, горелочные камни установлены в стенке футерованного корпуса встык с устьем горелок, при этом

расстояние от передней торцевой стенки корпуса горна до оси первого ряда горелок составляет 0,15 – 0,20 длины горна, расстояние между осями горелок равно 1,5 – 1,8 расстояния до поверхности слоя шихты на колосниковой решетке и отношение длины горна к длине колосниковой решетки равно 0,12 – 0,16.

Длина горна, составляющая 12 – 16% длины колосниковой решетки, является оптимальной, так как позволяет поддерживать заданный режим нагрева шихты по длине горна, что обеспечивает высокоинтенсивное зажигание твердого топлива в шихте и повышает прочность верхних слоев спека. Если расстояние между осями горелок меньше 1,5 расстояния до поверхности слоя шихты на колосниковой решетке и угол раскрытия факела горелки меньше 25° , это приводит к снижению качества зажигания шихты, т.е. к отсутствию зажигания шихты у бортов колосниковой решетки и очаговому зажиганию шихты по поверхности слоя. Если же расстояние между осями больше 1,8 расстояния до поверхности слоя шихты на колосниковой решетке и угол раскрытия факела горелки больше 45° , это приводит к нарушению равномерности температурного поля по длине горна и к частичному оплавлению верхней части спека, что в свою очередь приводит к резкому снижению газопроницаемости слоя.

ЗСМК имеют зажигательные горны с расположенными на своде плоско факельными горелками (рисунок 1.12). В существующем устройстве горна горелки формируют факел, омывающий свод и стены.



1 – горелка; 2 – подвод газа; 3 – подвод газа; 4 – горелочный камень.

Рисунок 1.12 – Существующая конструкция горна агломерационной машины

Зажигание шихты происходит за счёт тепловой энергии продуктов сгорания, передаваемой излучением раскалённой обмуровки и потоком просасываемых через шихту газов. Удельный расход топлива данного горна составляет порядка 184 МДж/т агломерата.

Известные конструкции зажигательного горна позволяют осуществлять эффективное сжигание топлива и прогрев шихты, расходуя около 150 МДж/т агломерата. Пример горелочного устройства такого горна (ГУП-2,8/1,5) показано на рисунке 1.13. Холодный воздух от вентилятора через

патрубки 6 поступает в нагнетательные полости балок 1. Из них воздух с высокой скоростью выходит через отверстия в перфорированных листах струйного охлаждения 4 в виде атакующих струй, омывающих нижнюю стенку балки, охлаждая её. Нагретый воздух вытекает в горн через завихрители горелок 2. Топливо подаётся через газовые сопла горелок, смешивается с воздухом, выходящим из завихрителей, и сгорает в рабочем пространстве горна вблизи свода.

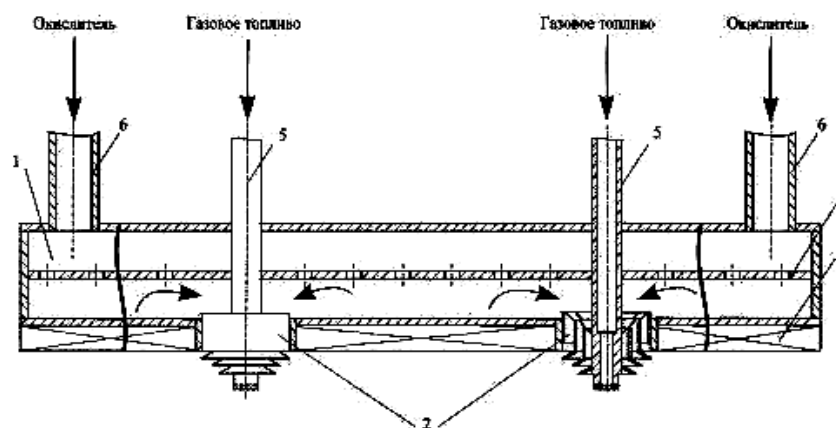
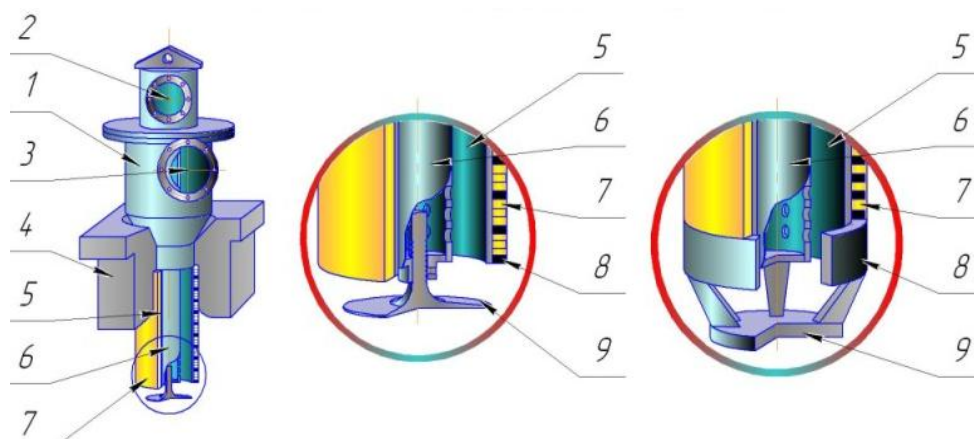


Рисунок 1.13 - Горелочное устройство горна ГУП-2,8/1,5

Однако применение такой конструкции требует капитальной реконструкции существующего горна и высоких капитальных затрат.

Рассмотрена возможность решения задачи снижения существующего удельного расхода газа с меньшими затратами и минимальными изменениями конструкции существующего горна, в период планового текущего ремонта горна (рисунок 1.14).



- 1 – существующая горелка; 2 – подвод газа; 3 – подвод воздуха; 4 – горелочный камень;
5 – внешняя труба (воздушная); 6 – внутренняя (газовая) труба; 7 – торкрет-масса;
8 – шипы; 9 – насадка-рассекатель.

Рисунок 1.14 – Возможные конструктивные решения

Возможная схема сжигания ферросплавного газа с плоскофакельными горелками предварительного смешения. С этой целью предлагается изменить существующую схему отопления горна (рисунок 1.15), чтобы с минимальными затратами осуществить настил факела на поверхность шихты, а не на свод горна.

Устройство работает следующим образом. В устройство для отопления горнов агломерационных машин подают топливо через патрубок 5 и трубу 4, а основную часть воздуха горения – через трубу 2. Поток топлива закручивают посредством ввода через тангенсальный патрубок 5, поток воздуха закручивают завихрителем 3. Оставшуюся часть воздуха горения подают по оси устройства прямым незакрученным потоком через центральную трубу 6, которая заглублена от торца в топливную трубу 4 на расстояние, равное $0,06 - 0,1$ ее выходного диаметра, и выполнена с площадью, составляющей $0,2 - 0,3$ площади выходной топливной трубы. В камере 7 все газопотоки перемешивают и полученную смесь сжигают в укороченном факеле. Применение устройства позволяет снизить расход газообразного топлива на $4 - 5\%$, снизить содержание мелочи 5 мм в агломерате на $7 - 9\%$ (рисунок 1.15).

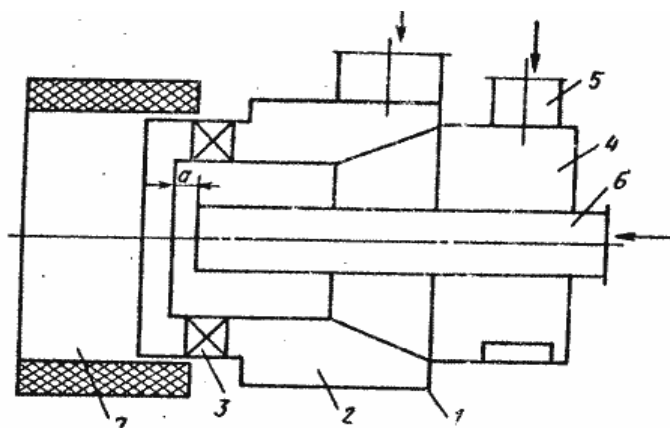


Рисунок 1.15 – Новая конструкция горелочного устройства горна агломерационной машины

Центральная воздухоподающая труба должна быть заглублена в топливную. Тем самым обеспечивается, во-первых, подача окислителя непосредственно в топливное ядро факела, во-вторых, регулирование интенсивности сжигания топлива, длины и формы факела посредством изменения массы центрального прямого незакрученного потока газов, в-третьих, регулирование распределения температурного поля в горне машины. В качестве воздуха горения, подаваемого через центральную трубу возможно использование запыленных рециркуляционных газов, т. к. по всему тракту рециркуляции отсутствуют препятствия (следовательно, истираемость металла) движению отдельных частиц пыли.

Применение изобретения обеспечивает при той же обработки слоя на $7 - 10\%$ и повышение стойкости футеровки горна в $1,2 - 1,4$ раза. Повышением равномерности спекания обусловлено увеличение удельной

производительности агломашин на 0,8 – 1,2% и улучшение качества готовой продукции (снижение выхода возврата на 3 – 4% и содержание класса -5 мм в агломерате на 7 – 9%.

Таким образом, улучшается зажигание поверхностного слоя шихты за счёт интенсификации теплообмена. Уменьшаются потери через обмуровку горна. Это позволяет получить необходимую температуру при большем избытке воздуха и, следовательно, большем содержании кислорода в шихте, для эффективного зажигания.

Агломашины типа МАК [11] снабжены малогабаритными зажигательными горнами, имеющим панели со встроенными вертикально установленными горелками. Такой горн обеспечивает снижение расхода газообразного топлива более чем на 50% по сравнению с ранее применявшимися горнами. Обеспечена возможность блочной замены горелочных панелей при ремонтах. Предусмотрено воздушное охлаждение нижних балок горна и бортов паллет.

Система отопления горнов агломерационных машин определяется технологическими требованиями к процессу агломерации и видом применяемого топлива. В связи с тем, что по мере продвижения шихты в подвижном слое происходят последовательно сушка, прогрев, плавление, кристаллизация расплава и охлаждение спека, различные требования предъявляются и к параметрам теплоносителя, фильтруемого через слой.

Наибольшее распространение получил комбинированный нагрев шихты с использованием твердого топлива, подаваемого в слой, и газообразного или жидкого топлива, сжигаемого над слоем в горне при помощи горелок.

В горне, расположенном в головной части машины, осуществляется начальная стадия обработки слоя: сушка, прогрев и зажигание твердого топлива в верхней части слоя. В связи с этим различные требования предъявляются и к горелкам. В зоне сушки температура теплоносителя в зависимости от вида шихты может быть на уровне 400 – 900 °С. После удаления влаги слой перемещается в зону интенсивного нагрева, где верхняя его часть нагревается до 1250 – 1300 °С. В этой зоне начинается воспламенение твердого топлива в шихте и в слое формируется зона активного горения. В этой части горна горелки должны работать с избытком воздуха, обеспечивающим и горение газа или мазута над слоем, и горение твердого топлива в слое. Зона активного горения перемещается вниз по ходу движения теплоносителя, и в ней при температурах 1200 – 1500 °С начинаются процессы плавления и спекания частиц шихты. По мере перемещения зоны активного горения вниз в верхних слоях начинается кристаллизация расплава и постепенное охлаждение слоя. Теплоноситель, просасываемый через верхние слои, нагревается в них и участвует в горении топлива, расположенного в нижних горизонтах.

Таким образом, по мере продвижения слоя шихты на тележках агломашин через рабочее пространство горна изменяются требования к температурам и составу теплоносителя, формируемого горелочными устройствами.

Применяют различную компоновку горелок в горне: на боковых стенах, на торцевых, на своде или комбинации этих способов. Каждая схема компоновки имеет свои преимущества и недостатки.

Наиболее удобным является расположение горелок на боковых стенах горна. В этом случае наиболее просто обеспечивается переменный уровень температур и концентраций газов над слоем по длине горна. Но при этом значительно сложнее обеспечить равномерность прогрева слоя и его зажигания по ширине горна, особенно при наличии неорганизованного присоса воздуха в горн через борта тележек.

При торцевом расположении горелок равномерность параметров по ширине слоя обеспечивается легче, но возникают сложности с обеспечением переменных и контролируемых параметров газов над слоем по длине горна. Кроме того, возникают сложности с размещением горелок из-за наличия на входном торце горна устройства для загрузки и укладки шихты и необходимости его обслуживания.

При сводовом расположении горелок вопросы обеспечения теплового режима горна решаются проще, но существенно усложняются условия работы горелок и их обслуживания.

Во всех случаях при отоплении горнов применяют короткофакельные вихревые горелки. Воздух может использоваться либо холодный, либо нагретый до 300 – 400 °С в охладителе агломерата.

2. Исследование тепломассообменных процессов при агломерации

2.1 Процесс спекания агломерата на агломашине

Под процессом спекания понимают совокупность превращений при которых сжигаемое просасываемое воздухом твердое топливо в слое шихты обеспечивает развитие высоких температур в зоне горения и оплавление материалов. В результате получается спек, обладающий необходимыми физико-химическими свойствами. Основными параметрами, характеризующими процесс спекания являются температура поверхности зажатой шихты, высота слоя, скорость спекания, температура в зоне горения, время пребывания шихты на ленте (скорость ленты) и степень законченности спекания.

Начальной стадией спекания является зажигание шихты, при котором необходимо воспламенить частицы содержащегося в ней топлива и внести в слой количество тепла, обеспечивающее дальнейшее развитие горения. Наряду с обеспечением необходимых температуры и количества тепла следует иметь в зажигательном горне соответствующий состав продуктов сгорания с тем, чтобы в них содержалось достаточное количество кислорода, идущего на сжигание топлива в слое.

Чтобы в горн не подсасывался со стороны холодный воздух или не выбивалось из него пламя, особенно со стороны бортов тележек, необходимо поддерживать определенное давление, а для обеспечения перемещения зоны горения и просасывания газов через слой создавать в вакуум-камерах под горном соответствующее разрежение.

При зажигании шихты основными факторами являются температура поверхности и количество тепла, аккумулируемое в верхнем слое шихты.

Определенное влияние на процесс зажигания оказывает величина разрежения под зажигаемым слоем. При слишком малом разрежении продукты горения просасываются медленно, что приводит к замедлению процесса зажигания, особенно скорости теплопередачи в нижние горизонты слоя, а также снижению скорости перемещения фронта горения твердого топлива. При повышенном разрежении теплопередача осуществляется слишком быстро, фронт горения отстает, концентрация тепла в зажигаемом слое снижается, в результате чего спек получается непрочным.

Спекание шихты ведется на колосниковой решетке паллет агломерационной машины методом просасывания воздуха. Просасываемый через слой шихты воздух образует зону горения высотой 15 – 35 мм с температурой 1400 – 1600 °С, передвигающуюся вниз с вертикальной скоростью спекания $w_c = 0,15 + 0,7$ мм/с. Спекаемая шихта перемещается от головной к хвостовой части машины со скоростью движения аглоленты $w_d = 60 + 120$ мм/с. В таких условиях зона горения приобретает форму наклонного плоского слоя (рисунок 2.3). В зоне длиной l_3 происходит зажигание сырой шихты 1; в зоне горения 2 осуществляется спекание шихты на участке длиной l_c ; готовый агломерат 4 образуется за зоной спекания. На участке

длиной l_0 агломерат охлаждается просасываемым воздухом. Сырая шихта и агломерат размещается на постели 3.

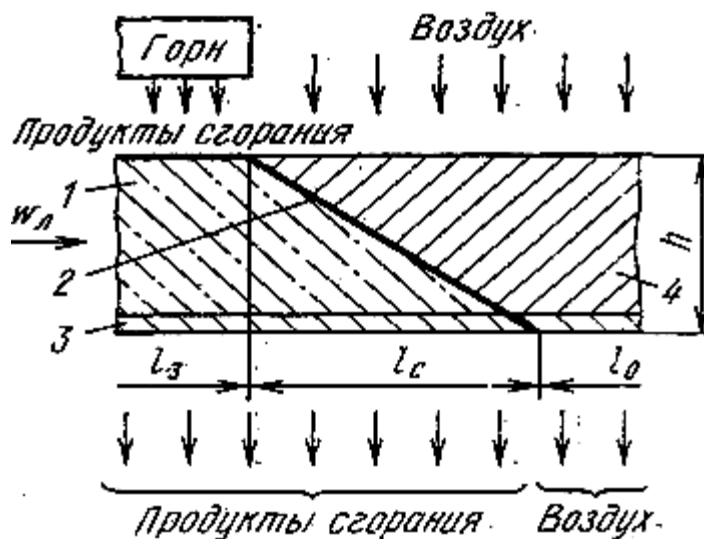


Рисунок 2.1 – Схема спекания шихты на агломашине

Основные параметры агломерационного процесса при установившемся режиме связаны соотношением:

$$\frac{l_c}{w_l} = \frac{h}{w_c} = t_c \quad (2.1)$$

где h – высота слоя шихты; t_c – время спекания

Скорость движения w_l поддерживается такой, чтобы процесс спекания заканчивался на заданной длине спекания l_c . В зоне горения спекаемый материал сплавляется, образуя пористый агломерат.

Температура регулируется в ходе всего процесса спекания, т.к. от этого зависит качество спекаемой шихты. При нормальном ходе процесса спекания агломерат равномерно спечен и при выдаче с ленты раскален не более чем на 1/3 высоты «пирога». На незаконченность процесса спекания указывает низкая температура отходящих газов в последних вакуум-камерах и наличие не спекшейся шихты в изломе «пирога» у колосников паллет. Повышение температуры отходящих газов в коллекторе происходит вследствие замедления скорости движения паллет или кратковременной остановки агломерационной машины; повышения газопроницаемости шихты. Понижение температуры отходящих газов в коллекторе имеет место при: уменьшении содержания топлива в шихте по сравнению с оптимальным; переоплавление поверхности слоя шихты из-за высокой температуры зажигания; наличие большого количества вредных прососов воздуха; завышение скорости движения паллет.

Основными показателями хода технологического процесса агломерации (выходными величинами) является производительность агломашины и качество агломерата. Производительность агломашины измеряют в тонах годного агломерата, полученного за час работы. Качество оценивают по химическому составу агломерата, прочности и восстанавливаемости его. Косвенным обобщенным показателем качества агломерата может служить отношение $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ в готовом продукте, однозначно связанное с технологическими свойствами агломерата.

Результаты агломерационного процесса во многом зависят от управления процессом спекания. Сложность процесса спекания как объекта автоматического управления определяется его зависимостью от большого числа технологических факторов, таких как свойство шихты, количество топлива, условия зажигания и т.д.

Управление процессом спекания заключается в стабилизации его законченности в определенной точке по длине аглоленты и в подборе входных параметров с целью обеспечения максимальной производительности и высокого качества агломерата. Для оценки и контроля хода процесса спекания используются такие показатели, как температура и состав отходящих газов, освещенность в вакуум-камерах, магнитная проницаемость слоя и др.

Законченность процесса спекания может нарушаться в результате изменений состава шихты, её влажности, степени уплотнения, высоты слоя шихты и скорости движения аглоленты. Все указанные возмущения в конечном итоге проявляются через изменение скорости спекания шихты, которая, таким образом, является возмущающим воздействием для системы управления законченностью спекания.

В качестве показателей законченности спекания шихты обычно используется температурные показатели процесса: температура в одной из последних вакуум-камер, разность или сумма температур в разных вакуум-камерах, температура в общем газовом коллекторе. Применение микропроцессорной техники позволяет использовать некоторые комплексные показатели.

В общем случае процесс спекания может быть представлен как многомерный объект с вектором состояния (выходные или управляемые величины) и вектором управления (управляющие воздействия). На выходные параметры могут воздействовать и возмущающие воздействия.

Агломерационная машина является многопараметровым объектом, в котором две основные выходные величины – производительность агрегата и качество конечного продукта, при этом эти параметры существенно зависят от ряда входных воздействий: горизонтальной скорости движения агломерационной ленты, высоты спекаемого слоя, производительности эксгаустера, условий зажигания и физико-химических свойств шихты. Три последних входных величины можно заменить одним комплексным параметром – вертикальной скоростью спекания, а в качестве единого

выходного параметра целесообразно принять активную длину агломерационной машины, в пределах которой завершается процесс спекания.

Процесс производства агломерата протекает в условиях возмущающих воздействий: изменения химико-минералогического и зернового состава компонентов спекаемой шихты, условий дозирования, транспортирования, смешения и увлажнения шихты, а также укладки шихты на агломерационную машину. Для устранения влияния возмущений на ход технологического процесса используют следующие основные управляющие воздействия: соотношение (дозирование) компонентов спекаемой шихты, содержание углерода (коксика) в шихте, влажность шихты, скорость движения аглоленты, разрежение в вакуум камерах и др.

Особенности процесса спекания и агломашины как объекта автоматического управления можно сформулировать следующим образом:

- агломашина представляет собой систему, характеризуемую многими входными и выходными параметрами;
- процесс непрерывный;
- работа агломашины подвержена резким возмущениям, связанным с произвольным изменением расхода шихты, запаздыванием системы и т.д.

Агломерационный процесс в целом характеризуется наличием обратных связей. Так, при неравномерной укладке шихты на аглоленту при изменении газопроницаемости отдельного участка шихты воздушные потоки по всей длине аглоленты перераспределяются, что создает эффект внутренних обратных связей. Значительное влияние на ход процесса оказывает добавка в шихту возврата. Наличие обратных связей значительно усложняет и затрудняет исследование процесса и его оптимизацию.

Входные параметры: влажность шихты; газопроницаемость шихты; содержание углерода в шихте; высота слоя шихты; скорость движения аглоленты; производительность эксгаустера; условия зажигания – температура горна (температура среды в горне), температура зажигания (температура над поверхностью спекаемой шихты), обобщенная температура, измеряемая при помощи термопары, установленной в середине горна, температура поверхности аглошихты; расход топлива; расход воздуха; расход компрессорного воздуха; расход воды на газоочистку, на скрубберы; длина аглоленты.

Выходные параметры: скорость спекания; состав и температура отходящих газов; разрежения в вакуум-камерах; температуры в вакуум-камерах; время пребывания шихты на аглоленте.

Возмущающие воздействия: изменение состава шихты; изменение влажности шихты; изменение степени уплотнения шихты; изменение высоты слоя шихты; изменение скорости движения аглоленты; подсосы холодного воздуха; изменение разрежения над зажигаемым слоем; изменение соотношения топливо-воздух.

Наиболее распространенным управляющим воздействием в системе автоматического управления процессом спекания является изменение скорости аглоленты. Для обеспечения окончания процесса спекания в одном и том же

месте по длине аглоленты скорость аглоленты w_l должна постоянно соответствовать скорости спекания шихты w_c :

$$w_l = \frac{l}{h_c} w_c \quad (2.2)$$

где l – расстояние от места зажигания до точки измерения;

h_c – заданная величина спеченного слоя в точке измерения.

Обычно добиваются окончания процесса спекания в конце аглоленты, т.е. при $\frac{l}{h_c} = \frac{l_l}{H}$ (где l_l – рабочая длина ленты; H – высота слоя шихты). При этом скорость аглоленты должны составлять:

$$w_l = \frac{l}{H} w_c \quad (2.3)$$

Для реализации указанного соотношения необходимо контролировать скорость спекания шихты. Одним из показателей скорости спекания может служить расход воздуха, просасываемого через спекаемый слой.

Качество зажигания шихты существенным образом влияет на ход процесса спекания. При недостаточно интенсивном зажигании верхняя часть слоя может оказаться неспекшейся. Чрезмерно же высокая температура в горне и, следовательно, интенсивность зажигания приводит к оплавлению верхнего слоя агломерата, ухудшению газопроницаемости и снижению скорости спекания. Для каждого конкретного условия существует определенное значение интенсивности зажигания, при котором достигается высокая производительность агломашины и удовлетворительное качество агломерата. Количество тепла, вносимого в слой шихты при зажигании, зависит от температуры продуктов сгорания, продолжительности зажигания, расхода топлива на зажигание и др. Весьма важным является выделение тепла за счет горения твердого топлива, содержащегося в самой шихте. Определенные затруднения при автоматизации зажигания шихты связаны с отсутствием точных методов и средств контроля его эффективности. Кроме того, процесс зажигания подвержен влиянию целого ряда возмущающих воздействий (изменения теплоты сгорания топлива зажигания, состава и свойств шихты, скорости аглоленты и др.); значительное влияние оказывает величина разрежения под зажигаемым слоем.

Таким образом, результаты процесса зажигания определяются рядом факторов, которые в значительной степени взаимосвязаны. В связи с этим в качестве основного показателя процесса зажигания часто применяют расход тепла зажигания q_t , приходящегося на единицу поверхности слоя шихты. Расход топлива в горне определяется в данном случае выражением:

$$V_T = \frac{q_T b w_L}{\eta Q_T} \quad (2.4)$$

где V_T – расход топлива на зажигание;
 b – ширина слоя шихты;
 w_L – скорость аглоленты;
 Q_T – удельная теплота сгорания топлива;
 η – тепловой к.п.д. зажигательного горна.

Тепловой режим процесса можно контролировать, измеряя интенсивность свечения зажженной шихты после горна. Интенсивность излучения зависит от содержания топлива в шихте. На интенсивность свечения поверхности пирога заметно влияет влажность шихты, разрежение в вакуум-камерах, продолжительность пребывания шихты под зажигательным горном, температура горна, крупность топлива и др. Таким образом, датчик светимости шихты может давать достоверные показания только при условии стабилизации некоторых параметров (влажности шихты, температуры горна) или введения коррекции (по скорости движения ленты, по разрежению).

По ходу процесса изменяется состав продуктов сгорания. Важнейшим фактором, определяющим состав отходящих газов, является содержание топлива в слое. Так как отношение $\text{CO}:\text{CO}_2$ в газе зависит от температуры сгорания углерода, то эту зависимость можно использовать для оценки температуры в зоне спекания по составу газа.

Один из основных показателей, характеризующих тепловой режим спекания, – механические свойства агломерата. Эти свойства обычно определяются путем различных испытаний, таких как разрушение агломерата во вращающемся барабане, сбрасыванием и др. При разгрузке агломерата с агломашины на колосниковый грохот также происходит своего рода испытание на прочность агломерата в естественных условиях. Количество выделяемого на грохоте возврата характеризует прочность получаемого агломерата. Таким образом, непрерывный контроль выхода возврата позволяет получать информацию об одном из важнейших свойств агломерата – его прочности.

Обеспечение высоких показателей агломерационного процесса может быть достигнуто путем его оптимизации, что предполагает выбор наиболее рациональных режимов зажигания и спекания шихты. В ходе процесса спекания оптимизирующие воздействия обычно направлены на изменение содержания углерода в шихте, влажности шихты и высоты спекаемого слоя. Непременным условием обеспечения автоматической оптимизации процесса является наличие на отдельных его участках автоматических систем стабилизации основных параметров.

2.2 Разработка математической модели агломерационного процесса

Физикоматематические модели агломерационного процесса могут быть получены аналитически, путем последовательного описания физических и

химических превращений в исходных материалах в процессе производства [21]. Динамическая математическая модель спекания агломерационной шихты, реализуемая на ЭВМ, позволяет быстро и с минимальными затратами исследовать влияние ведущих параметров процесса спекания (высоты слоя шихты, содержания углерода и влаги в шихте, скорости движения спекательных тележек и др.) на его технико-экономические показатели и может быть использована в качестве информационной части в АСУ агломерационным производством для оптимизации технологического процесса.

Алгоритм моделирования в математической форме отражает физико-химические превращения и тепловые явления в спекаемом слое шихты практически в той мере, в какой процесс агломерации в настоящее время может быть описан аналитически.

В алгоритм модели процесса спекания включены зажигание, сушка (переувлажнение) шихты, горение топлива, нагрев и охлаждение слоя шихты, изменение расхода газов, плотности шихты, теплоемкости материалов и газов, коэффициентов тепло- и влагообмена по ходу технологического процесса. Некоторые химические (в том числе минералогические) превращения в настоящее время исследованы и описаны не достаточно полно, поэтому их влияние на процесс можно учесть только приблизительно, путем некоторой коррекции теплофизических свойств шихты и агломерата, материального баланса и других хорошо изученных факторов.

Математическая модель основана на следующих предпосылках. Ввиду малых размеров частиц шихты их температура постоянна по объему:

- все частицы элементарного объема шихты, расположенные на одном горизонте слоя, имеют одинаковую температуру;
- тепловые эффекты реакций локализованы в объеме частиц шихты;
- теплообмен между шихтой и газовым потоком происходит при граничных условиях третьего рода;
- теплообмен теплопроводностью или излучением между слоями шихты, расположенными на различных горизонтах, отсутствует;
- теплота плавления и кристаллизации выражена зависимостью теплоемкости материалов от температуры;
- теплоемкости шихты и агломерата одинаковы; теплота экзо- и эндотермических реакций, а также потери теплоты с механическим недожогом и в окружающую среду определяются путем коррекции тепловыделения при горении коксика (по тепловому балансу);
- кислород диссоциирующих оксидов рассчитывается по уравнению, в котором содержание кислорода в воздухе корректируют с помощью коэффициентов (по материальному балансу);
- аккумуляцией теплоты и массы газами в слое можно пренебречь, так как она мала по сравнению с аккумуляцией теплоты и массы материалами;
- теплоемкость газов не зависит от их состава.

Многие из этих допущений не влияют сколько-нибудь существенно на структуру алгоритма моделирования.

В слое спекаемой агломерационной шихты протекают процессы горения топлива, тепло- и влагообмена; изменяются давления водяных паров в газах, насыпная плотность шихты, теплоемкость шихтовых материалов, агломерата и продуктов сгорания. Некоторые из этих физических и химических явлений математически могут быть охарактеризованы системой алгебраических уравнений, не содержащих пространственной координаты и времени. Действительно, зависимости коэффициента теплоотдачи от температуры и состава шихты или теплоемкости газов от температуры сохраняются в любом месте слоя в любой момент времени. Это же относится и к другим подобным зависимостям. Рассмотрим алгебраические уравнения модели.

При горении топлива выделяется теплота:

$$q_c = (1 + a_{\text{экз}} - a_{\text{энд}} - a_{\text{м.н.}} - a_n) (a_{\text{CO}_2} q_{\text{CO}_2} + a_{\text{CO}} q_{\text{CO}}), \quad (2.5)$$

где $a_{\text{экз}}$, $a_{\text{м.н.}}$, a_n - тепловые эффекты экзо- и эндотермических реакций, потери с механическим недожогом и в окружающую среду, выраженные в долях от теплоты сгорания;

$a_{\text{CO}_2}, a_{\text{CO}}$ - доля углерода, сгорающего до CO_2 и CO ;

$a_{\text{CO}_2}, q_{\text{CO}}$ - теплоты сгорания углерода до CO_2 и CO .

Совместное протекание тепло- и влагообмена в слое характеризуется психрометрическим коэффициентом:

$$A = \frac{a_V}{\varepsilon_V r}, \quad (2.6)$$

здесь a_V , ε_V - объемные коэффициенты теплоотдачи и влагообмена;
 r — теплота парообразования.

Коэффициент теплоотдачи между газами и шихтой зависит от скорости и температуры газов и уменьшается в процессе сушки и спекания шихты, поэтому можно записать:

$$a_V = a_{V_0} v^m T_G^b (1 + K_c C + K_w W) \quad (2.7)$$

где v^m - скорость продуктов сгорания в свободном сечении слоя;

T_G^b - абсолютная температура газа;

C - содержание углерода в шихте;

W - влажность шихты;

a_{V_0}, m, b, K_c, K_w - постоянные.

Давление насыщенных водяных паров в продуктах сгорания $P_{\text{нас}}$ зависит от температуры шихты $t_{\text{ш}}$ и величины нормального давления $P_{\text{н}}$:

$$P_{нас} = P_n \exp\left(\frac{17,75t_{ш}}{t_{ш}} - 5,1113\right) \quad (2.8)$$

Парциальное давление водяных паров в газах $P_{в.п.}$ можно выразить через парциальную скорость и абсолютное давление продуктов сгорания P :

$$P_{в.п.} = P \frac{v_{H_2O}}{v} \quad (2.9)$$

Насыпная плотность шихты зависит от ее абсолютной плотности и пористости Π :

$$\rho_{ш} = (1 - \Pi)\rho_a \quad (2.10)$$

Если допустимо некоторое уменьшение точности моделирования, то можно принять $\rho_{ш} = \text{const}$. Для расчетов повышенной точности может быть использована величина усадки шихты, зависящая от разрежения в вакуум-камерах, высоты слоя и других факторов. На теплоемкость шихтовых материалов $C_{ш}$ и газов C влияет температура шихты $t_{ш}$ и газов $t_{г}$:

$$C_{ш} = C_{ш0} + C'_{ш}t_{ш} + C''_{ш}\exp[-a_{ш}(t_{ш}-t_0)^2] \quad (2.11)$$

$$C = C_{Г0} + C_{Г}t_{Г} \quad (2.12)$$

где $C_{ш0}, C'_{ш}, C''_{ш}, a_{ш}, t_0, C_{Г0}, C_{Г}$ - постоянные.

Продукты сгорания, проходящие через спекаемый слой, состоят из кислорода, водяных паров и других газов, поэтому парциальные скорости связаны соотношением:

$$v_{Г} = v - v_{O_2} - v_{H_2O} \quad (2.13)$$

Физические и химические превращения в спекаемом слое агломерационной шихты протекают во времени τ и в пространстве (по высоте слоя, пространственная координата Z). Эти динамические процессы (сушка, горение углерода, изменение температуры, концентрации кислорода в газах, парциальной скорости водяных паров и кислорода по высоте слоя) характеризуются системой дифференциальных уравнений в частных производных по τ и Z . Скорость сушки шихты (или ее переувлажнения) пропорциональна разности относительных давлений водяных паров:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = - \frac{100\varepsilon_v}{\rho_{ш}} \left[\frac{P_n}{P} \exp\left(\frac{17,75t_{ш}}{248+t_{ш}} - 5,1113\right) - \frac{v_{H_2O}}{v} \right] f(W) \quad (2.14)$$

В процессе сушки влага мигрирует внутри частиц шихты, поэтому влажность последней необходимо учитывать:

$$f(W) = \frac{W^S}{(N + W^S)} \quad (2.15)$$

где S, N — постоянные.

Эксперименты по динамике сушки агломерационной шихты показали, что $N = 5,64$ и $S = 1,13$, если W выражена в процентах на сухую массу. Для процесса переувлажнения $f(W) = 1$, так как в этом случае миграция влаги в частицах шихты на скорости процесса не отражается. Из уравнения материального баланса влаги следует

$$\frac{\partial v_{H_2O}}{\partial Z} = - \frac{\rho_{ш}}{100\rho_{H_2O}} \cdot \frac{\partial W}{\partial \tau} \quad (2.16)$$

где ρ_{H_2O} — плотность водяных паров.

Исследования горения углерода в слое показали, что градиент концентрации кислорода в газах по высоте слоя сложным образом зависит от параметров процесса — концентрации кислорода в газе $\rho_2 = \frac{v_{O_2}}{v}$, среднего радиуса частицы топлива R_c , плотности топлива и др.:

$$\frac{\partial O_2}{\partial Z} = - \frac{D}{VR_c} \cdot \frac{\rho_{ш}}{\rho_c} \cdot \frac{C}{100} O_2 e^{-\frac{E}{RT_{ш}}} \quad (2.17)$$

где D, R, E — постоянные.

Так как текущие значения R_c и C связаны с начальными значениями $R_{Cнач}$ и $C_{нач}$ соотношением $\frac{R_c}{R_{Cнач}} = \sqrt[3]{\frac{C}{C_{нач}}}$, то

$$\frac{\partial O_2}{\partial Z} = - \frac{D\sqrt{C_{нач}}}{R_{Cнач}} \cdot \frac{C^{2/3}}{100} \cdot \frac{\rho_{ш}}{\rho_c} O_2 e^{-\frac{E}{RT_{ш}}} \quad (2.18)$$

На основании уравнения (2.17) с учетом материального баланса кислорода и углерода можно записать уравнение скорости горения углерода:

$$\frac{\partial O_2}{\partial Z} = - \frac{D\sqrt{C_{нач}}}{R_{Cнач}} \cdot \frac{C^{2/3}}{100} \cdot \frac{\rho_{ш}}{\rho_c} O_2 e^{-\frac{E}{RT_{ш}}} \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = - \frac{D^3 \sqrt{C_{нач}}}{R_{C_{нач}}} M C^{2/3} \frac{\rho_{O_2}}{\rho C} O_2 e^{\frac{E}{RT_{ш}}} \quad (2.20)$$

где $M = \left(\frac{12}{32}\right) \alpha_{CO_2} + \left(\frac{12}{16}\right) \alpha_{CO}$ - стехиометрический коэффициент;
 ρ_{O_2} - плотность кислорода.

Из уравнений (2.17) и (2.18) получаем выражение изменения парциальной скорости кислорода по высоте слоя:

$$\frac{\partial V_{O_2}}{\partial Z} = \frac{1}{M} \frac{\rho_{ш}}{100 \rho_{O_2}} \frac{\partial C}{\partial \tau} \quad (2.21)$$

Составив уравнение теплового баланса газового потока, найдем градиент температуры газов по высоте слоя $\frac{\partial t_r}{\partial Z}$ и скорость изменения температуры шихты $\frac{\partial t_{ш}}{\partial \tau}$:

$$\frac{\partial t_r}{\partial Z} = - \frac{\alpha_V (t_r - t_{ш})}{C_r \nu} \quad (2.22)$$

При этом

$$\frac{\partial t_{ш}}{\partial \tau} = \frac{F}{Q} \quad (2.23)$$

$$F = \frac{\alpha_V}{\rho_{ш}} (t_r - t_{ш}) + \frac{4,1868}{100} \frac{\partial W}{\partial \tau} (595 + 0,47 t_r - t_{ш}) - \frac{q_C}{100} \frac{\partial C}{\partial \tau} \quad (2.24)$$

$$Q = C_{ш} + 4,1868 \frac{W}{100} \quad (2.25)$$

Уравнения (2.5) - (2.21) являются аналитической основой математического моделирования агломерационного процесса на ЭВМ. Расчетная схема модели спекаемого слоя представлена на рисунке 2.2.

Моделирование выполняется на ЭВМ при следующих условиях:

$$\alpha_{CO_2} = 0,8; \alpha_{CO} = 0,2; q_{CO_2} = 32815 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; q_{CO} = 9210 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$\alpha_{экз} = 0,075; \alpha_{энд} = 0,175; q_{mn} = 0,015; a_n = 0,14; A = 3,13 \text{ К};$$

$$r = 2284 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; \alpha_{V_o} = 23500 \frac{\text{Вт}}{(\text{м}^3 \cdot \text{К})}; m = 0,8; b = 0,25;$$

$$K_C=0,3; K_W=0,32; \rho_{uo}=1800 \text{ кг/м}^3; C_0=3,7\%; W_0=7,0\%;$$

$$C_{uo}=0,92 \frac{\text{кгДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}; C_w=0,0004 \text{ кгДж/(\text{кг}\cdot\text{К}^2)};$$

$$C_w=2,79 \frac{\text{кгДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}; \alpha_w=0,000025 \text{ К}^{-2}; t_o=1570^\circ\text{C};$$

$$C_{GO}=1335 \frac{\text{кгДж}}{\text{м}^3\cdot\text{К}}; C_G=0,222 \text{ Дж/(\text{м}^3\cdot\text{К}^2)}; D=3570;$$

$$C_{нач}=3,7\%; R_{C_{нач}}=0,001; \rho_c=2200 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \frac{E}{R}=8000;$$

$$\rho_{o_2}=1,335 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \rho_{H_2O}=0,749 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; p=101325 \text{ Па}; M=0,45;$$

$$h=160 \text{ мм}; n=160; \Delta Z = \frac{160}{160} = 1 \text{ мм} = 0,001 \text{ м}; \Delta \tau = 1 \text{ с}.$$

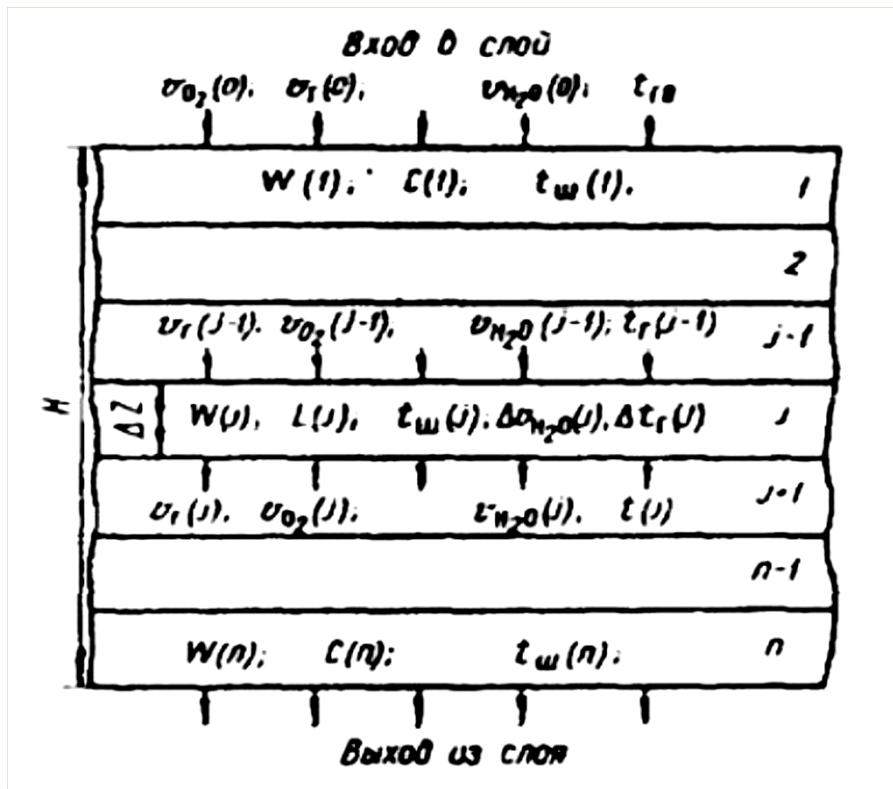


Рисунок 2.2 - Расчетная схема модели спекаемого слоя агломерационной шихты

Это все входные параметры, которые используются для исследования.

Результатом эксперимента является кривая, показывающая изменение температуры в элементарном слое, отстоящем от поверхности на 30 мм, т.е. выходными данными являются температура и время.

Разработана математическая модель процесса спекания агломерата на агломашине. На основании математических формул разработана программа, демонстрирующая изменение температуры в спекаемом слое по длине аглоленты.

2.3 Исследование газодинамики агломерационного процесса

Процесс агломерации связан с просасыванием или продувом газов через спекаемый слой. Количество воздуха, подведенного к зоне горения твердого топлива, определяет скорость горения частиц коксовой мелочи, а количество и температура отходящих из зоны горения газообразных продуктов реакций — интенсивность теплопередачи под этой зоной. В связи с этим вертикальная скорость спекания при вакуумной агломерации в подавляющем большинстве случаев прямо пропорциональна газопроницаемости спекаемого слоя. Следовательно, при подготовке шихты к спеканию инженерный персонал аглофабрик должен больше внимания уделять повышению ее газопроницаемости.

Зависимость между разрежением Δp под колосниковой решеткой, скоростью фильтрации воздуха W , $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, просасываемого через слой высотой H , м, описывается уравнением Л. К. Рамзина (1928 г.):

$$\Delta p = AHW^n. \quad (2.24)$$

Иногда используют также уравнение Дарси—Вейсбаха:

$$\Delta p = H(aW + bW^2). \quad (2.25)$$

Величина коэффициентов a , b , A , n зависит от фракционного состава окомкованной шихты и газодинамических особенностей слоя шихты после его укладки на паллеты. Значения a , b , A увеличиваются по мере уменьшения крупности комков шихты, ухудшения условий окомкования, снижения количества добавок извести или других веществ, способствующих интенсификации процесса окомкования шихты. Рост этих коэффициентов приводит к снижению скорости фильтрации воздуха через слой и производительности агломерационной ленты.

Ниже приведены газодинамические характеристики агломерационных шихт, которые расположены в порядке возрастания удельного газодинамического сопротивления p/H , а также фактические скорости фильтрации воздуха на действующих агломерационных фабриках, коэффициенты уравнений Дарси—Вейсбаха и Рамзина приведены в таблице 2.1.

Максимальные потери напора соответствуют зонам горения твердого топлива и подогрева шихты. По данным Л. И. Александрова, на границе зоны

подогрева шихты с сырой шихтой образуется так называемый «запирающий» слой, газопроницаемость которого понижена. Здесь на поверхности частиц сырой агломерационной шихты и между частицами шихты концентрируется пыль, получающаяся при разрушении комков шихты в зоне подогрева.

Было установлено, что при одинаковом разрежении количество воздуха, просасываемого через спекаемый слой в единицу времени, снижается с уменьшением среднего размера частиц шихты. При этом убывают вертикальная скорость спекания, производительность агломерационных лент. Доля тонких концентратов в рудной части агломерационных шихт увеличивается с каждым годом, достигая в отдельных промышленных районах страны 60—80 %.

Таблица 2.1 - Газодинамические характеристики агломерационных шихт

Предприятие	$W, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	$H, \text{ мм}$	$\Delta p, \text{ Па}$	a	b	A	n
Бакальская аглофабрика	0,294	0,300	2590	14460	50695	54488	1,505
«Запорожсталь»	0,366	0,390	7818	14570	109850	114315	1,732
Челябинский комбинат	0,281	0,240	3895	14874	152580	147741	1,740
Карагандинский комбинат	0,290	0,450	10899	28286	190456	188823	1,659
Магнитогорский комбинат	0,336	0,198	6259	63257	91727	134245	1,326
Орско-Халиловский комбинат	0,309	0,240	6896	51363	134724	156825	1,445
«Тулачермет»	0,340	0,220	7495	42767	168920	185316	1,570
Высокогорская аглофабрика	0,310	0,195	6239	39984	203965	210815	1,610
Коммунарский комбинат	0,253	0,320	7730	14572	319806	305411	1,846
НКГОК	0,240	0,260	6622	68752	155688	174868	1,350
Горноблагодатская фабрика	0,280	0,150	6063	52480	328095	323525	1,634
Качканарский ГОК	0,190	0,200	6769	70697	565433	482487	1,600
Лебяжинская фабрика	0,164	0,180	5690	93189	607045	488147	1,514

Концентрат значительно ухудшает газопроницаемость спекаемого слоя. При замене каждых 10 % агломерационной руды (<8 мм) концентратом (<74 мкм) производительность установок уменьшается в среднем на 4—5 %. Производительность, достигаемая при спекании аглоруды, 1,9—2,0 т/(м²·ч) при работе на 100 % концентрата в шихте снижается до 1,0—1,3 т/(м² ч). В этих условиях принимают специальные меры для улучшения газопроницаемости шихты.

Перед спеканием увлажненную шихту окомковывают во вращающихся барабанах, где концентрат накатывается на поверхность более крупных частиц руды и возврата. При этом образуются мелкие гранулы диаметром до 1—3 мм. Следует опытным путем подбирать оптимальное число оборотов барабана, его угол наклона и степень заполнения шихтой. Определенный эффект дает и удлинение барабана (до 8-10 м на некоторых агломерационных фабриках).

Кроме того, увлажнение шихты до оптимального уровня обеспечивает наилучшую ее комкуемость, газопроницаемость и, следовательно, максимальную вертикальную скорость спекания. Непрерывный контроль фактической влажности шихты осуществляют с помощью нейтронных влагомеров, показания которых используют для автоматического поддержания влажности на оптимальном уровне.

При окомковании следует обращать также внимание на качество подаваемой в барабан воды. Установлено, что наилучшая комкующая способность у воды при $pH = 1-3$ и $pH = 11-13$; при использовании воды при $pH = 7-9$ результаты хуже. Таким образом, небольшие добавки кислот или щелочей к воде могут существенно влиять на процесс окомкования, улучшая смачиваемость шихты водой.

При производстве офлюсованного агломерата в шихту вводят измельченный до <3 мм известняк, повышающий ее комкуемость, вертикальную скорость спекания и производительность.

Еще более сильное действие оказывают добавки извести или извести-пушонки к шихте (рисунок 2.3). При увлажнении шихты мельчайшие частицы известняка и извести образуют гели, являющиеся минеральными клеями. После подсыхания комков шихты, особенно при вылеживании, действие этих клеев усиливается.

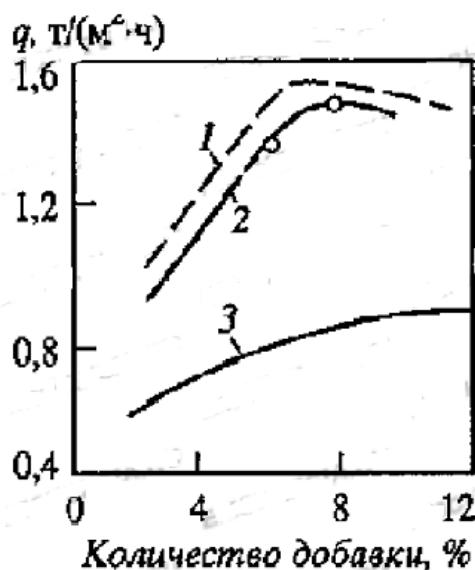


Рисунок 2.3 – Влияние содержания извести 1, извести-пушонки (2), известняка (3) в шихте на удельную производительность агломерационной установки

Известь, реагируя с водой, образует кристаллический гидрат оксида кальция — портландит $Ca(OH)_2$, который прочными кристаллическими мостиками скрепляет частицы шихты. В результате комочки шихты в первый период нагрева (до $400-450^{\circ}C$) под зоной горения твердого топлива не рассыпаются. В настоящее время агломерационная шихта содержит в среднем $20,0-80,0$ кг извести в расчете на 1 т агломерата. Кусочки возврата, особенно в шихте из тонких концентратов, увеличивают средний диаметр частиц.

Кроме того, на поверхность кусочков возврата, являющихся центрами окомкования, налипает концентрат. Это приводит к росту газопроницаемости спекаемого слоя, повышению вертикальной скорости спекания, производительности установки и к улучшению качества агломерата. Однако выше определенного предела (20—30% массы рудной части шихты), несмотря на продолжающееся увеличение газопроницаемости шихты, производительность агломерационной ленты начинает снижаться, так как возврат является браком, отходом производства. При 100% возврата в шихте производительность ленты равна нулю.

Оптимальное содержание возврата в шихте необходимо определять в каждом конкретном случае опытным путем (рисунок 2.4). Поскольку количество возврата в шихте всегда равно количеству возврата, образующегося при дроблении, охлаждении и транспортировке агломерата, регулировка доли возврата в шихте возможна лишь путем изменения качества пирога агломерата. Ввод извести в шихту улучшает ее комкуемость, снижая тем самым разрыхляющее действие возврата и уменьшая его оптимальное содержание в шихте.

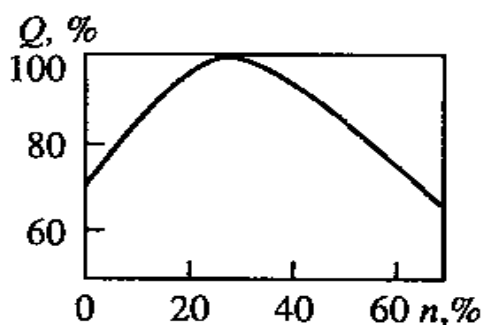


Рисунок 2.4 - Зависимость производительности агломерационной машины от доли возврата части шихты. По данным Г. Рауша и Ф. Каппеля, 1961 г.

При агломерации влага шихты испаряется в зоне подогрева и сушки шихты; водяные пары присоединяются к отходящим из этой зоны газам. Разложение гидратов идет в зоне подогрева и частично непосредственно в зоне горения твердого топлива. Образующиеся при этом водяные пары также присоединяются к отходящим газам. Как показали расчеты и эксперименты, точка росы отходящих газов меняется по ходу спекания от 30 до 60 °С. Соприкасаясь с частицами холодной шихты под зоной нагрева и сушки, газы охлаждаются ниже точки росы, что приводит к интенсивной конденсации влаги, переувлажнению шихты на 20—35% и резкому ухудшению ее газопроницаемости. Процесс переувлажнения слоя сырой шихты идет очень быстро (3 – 4 мин).

Затем конденсация влаги из газа прекращается, так как к этому моменту шихта прогревается до точки росы за счет теплоты конденсации при переувлажнении. Переувлажнение шихты при спекании тонких концентратов приводит к снижению производительности агломерационной ленты на 20-30%. В. В. Виноградов установил, что это явление можно устранить

предварительным подогревом агломерационной шихты перед спеканием до температур, превышающих точку росы отходящих агломерационных газов (60–70 °С).

Нагрев шихты можно осуществлять смешиванием ее с горячим (300—500 °С) возвратом (до изобретения В. В. Виноградова горячий возврат заливали водой и подавали в шихту холодным), а также продувкой шихты в бункере паром (способ, предложенный ДонНИИЧМ).

В последнем случае шихта в бункере нагревается теплом конденсации пара, что сопровождается доувлажнением шихты в среднем на 1 %, это необходимо учитывать при первичном увлажнении шихты в барабанных окомкователях. Подогрев шихты, каким бы способом он не осуществлялся, дает возможность полностью устранить переувлажнение и повысить производительность агломерационных машин на 20—30%, что является важным резервом аглофабрик.

Как видно из уравнения Рамзина, при постоянном разрежении количество просасываемого через спекаемый слой воздуха уменьшается с увеличением высоты слоя шихты на машине. Теоретически выгоднее работать с низким слоем (180—200 мм), получая повышенную производительность установки. На практике спекание в низком слое неизбежно ведет к перерасходу коксовой мелочи, ухудшению качества агломерата и росту себестоимости продукта.

Экономичный режим работы агломерационных лент с высоким (до 450—500 мм) слоем шихты может быть осуществлен при тщательном окомковании шихты с добавкой 70–80 кг извести на 1 т агломерата.

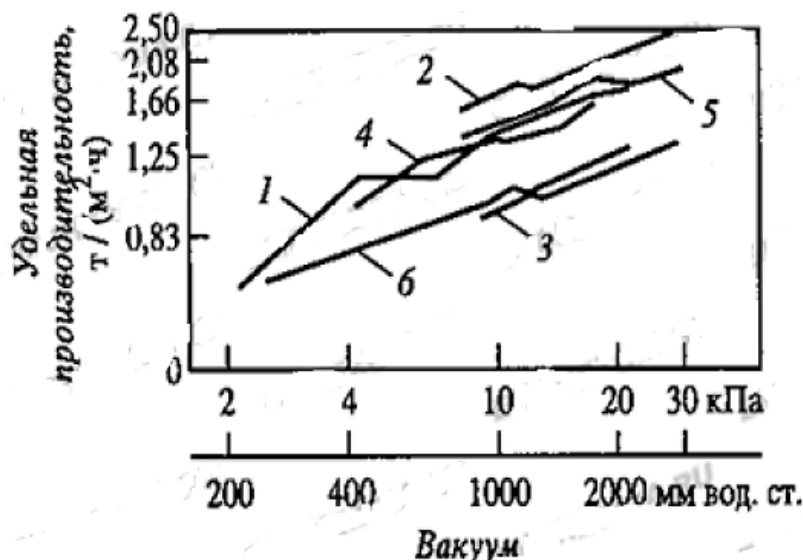
Увеличение разрежения под колосниковыми решетками паллет позволяет увеличить при одинаковом качестве шихты скорость фильтрации воздуха через слой (уравнение Рамзина).

В настоящее время наблюдается общая тенденция к увеличению разрежения под лентами (рисунок 2.5). В Японии при спекании разрежение доводят до 18,0–20,0 кПа. Норма удельного расхода в расчете на 1 м² поверхности спекания лент также растет, составляя 100–120 м³/(м²·мин). К сожалению, увеличение разрежения сопряжено с дополнительным расходом электроэнергии, что выше определенных пределов (14,7—15,68 кПа) увеличивает себестоимость агломерата.

С повышением разрежения усиливаются и вредные прососы воздуха через уплотнения под паллетами. Если принять объем газов, отсасываемых эксгаустером, за 100%, то на новых лентах с хорошо отлаженными уплотнениями вредные прососы составят 20—30%, а в обычных условиях 50—60%. Иными словами, приблизительно половина газов, отсасываемых эксгаустером, не проходит через шихту, а прорывается через уплотнения между паллетами и вакуум-камерами. В связи с этим важной задачей является разработка эффективных конструкций уплотнений.

В начальный период агломерации газопроницаемость шихты ухудшается по причине появления расплава, переувлажнения шихты, усадки слоя с уменьшением порозности слоя. При этом увеличивается разрежение (максимум

находится на вакуум-камерах № 3—6 ленты). Затем начинает сказываться постепенное усиление газопроницаемости слоя из-за непрерывного роста толщины слоя готового агломерата. Резкое увеличение уровня вредных прососов воздуха на крайних вакуум-камерах лент связано с плохой работой торцовых уплотнений.



1,4 — руды Венесуэлы; 2, 5, 6 — смеси богатых гематитовых руд;
3 — бурого железняка Эльзас-Лотарингии

Рисунок 2.5 – Рост удельной производительности агломерационной установки с повышением вакуума при спекании

Вынос пыли при агломерации наибольший на двух крайних вакуум-камерах машин. В головной части ленты некоторое количество шихты проваливается через постель, отверстия в колосниковой решетке и подхватывается отходящими газами (первый максимум пылевыноса). В процессе спекания сырая шихта под зоной подогрева и сушки, в которой имеет место разрушение рудных комочков, задерживает пыль, являясь своеобразным фильтром. Однако в хвостовой части ленты, где зоны горения, подогрева и сушки шихты вплотную подходят к колосниковой решетке, этот фильтр уже отсутствует (второй максимум пылевыноса). Целесообразны в связи с этим дополнительные пылеуловители перед сборным газоотводом на первых и последних вакуум-камерах, позволяющие улавливать главную массу пыли еще до основной очистки газов перед эксгаустером

3 Пути повышения теплотехнических и экологических показателей работы агломерационных машин

3.1 Анализ опыта работы агломерационных машин с рециркуляцией аглогазов

Перспективными направлениями снижения расхода газообразного и твердого топлива, улучшения качества агломерата и повышения производительности агломашины являются утилизация тепла охлаждения агломерата и рециркуляция аглогаса.

При средних по аглофабрикам отрасли затратах топлива на зажигание и спекание шихты, эквивалентных в 1989 г. 1,7 ГДж/т агломерата, с агломератом и возвратом терялось 45 – 55 % тепла. На агломашинах с зоной охлаждения или отдельно расположенными охладителями воздух, нагретый при охлаждении агломерата до температуры более 200 °С, целесообразно использовать в технологических и энергетических целях [1].

Другим направлением использования тепла с одновременным сокращением выбросов в атмосферу технологического газа и пыли являются отбор их из тракта дымовой трубы и подача в слой части аглогаса. При этом благодаря его температуре (120 – 150 °С), дожиганию содержащегося в нем оксида углерода, наличию в рециркулянте паров воды, способствующих уменьшению химического недожога при горении твердого топлива, снижаются расход тепла на тонну агломерата и выбросы пыли [2]. Попадая в слой, пыль спекается с ним, увеличивая выход годного продукта.

Впервые в СНГ система утилизации тепла, выделяемого в процессе охлаждения агломерата воздухом, была реализована на аглофабриках Карагандинского металлургического комбината по проекту Казгипромеца на основании технического задания ВНИИМТа.

Горячий воздух отводился в горелки зажигательного горна и в слой за ним. На машине К-3-75/155 аглофабрики № 1 (рис. 3.1) первые вакуум-камеры зоны охлаждения (№ 17 – 21) были переключены на отдельный коллектор с дымососом ДН-17. Для очистки воздуха установлены два циклона ЦН-15У. После дымососа воздух с температурой 300 – 310 °С разделялся на две нитки. По одной воздух подавался в укрытие, установленное на рабочей площадке агломашины над вакуум-камерами № 5–9, по второй — с помощью вентилятора ВГДН-15 в горелки горна. Площадь подачи горячего воздуха, включая горн и укрытие над слоем, составила 60 % площади спекания машины.

Эксплуатация с августа 1994 г. показала работоспособность установки. Выбивания горячего воздуха на рабочие площадки и ухудшения условий труда не отмечено. Расход газа на зажигание уменьшился на 15– 20 % (в среднем на 2,4 кг/т агломерата, здесь и далее в пересчете на условное топливо). Разрежение в вакуум-камерах зоны охлаждения увеличилось от 3,5 до 4,1 кПа. Производительность агломашины возросла на 2,7 %. Расход

твердого топлива при проведении испытаний с выделением агломашины на отдельную шихтовую цепочку сократился по сравнению с соседними машинами на 3 кг/т агломерата.

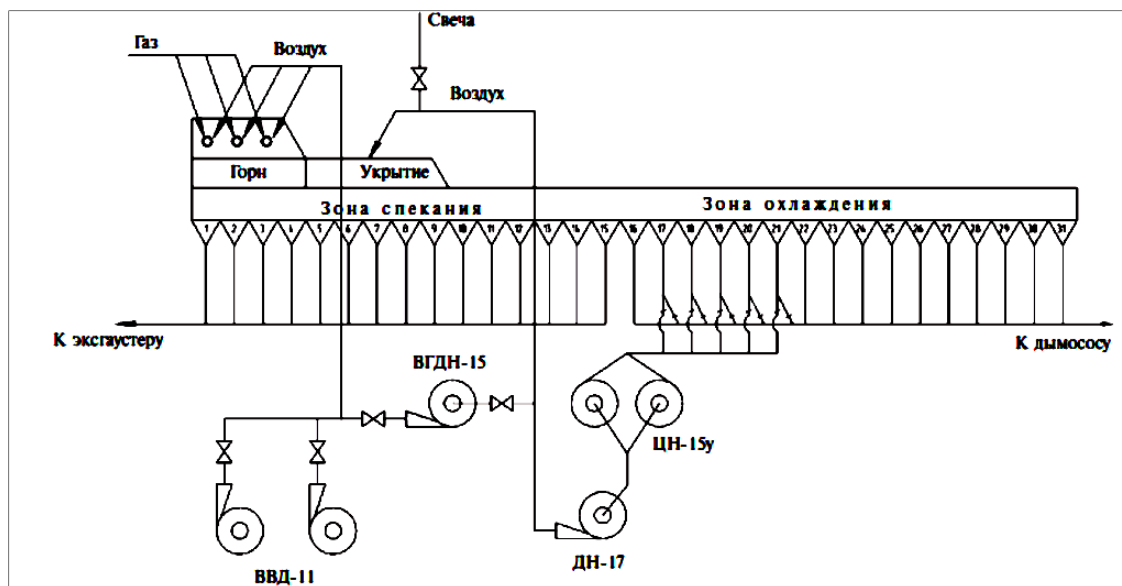


Рисунок 3.1 – Схема утилизации тепла на агломашине АКМ-75/155

Опыт, полученный на этой аглофабрике, был использован в дальнейшей работе. На машине АКМ-312 аглофабрики № 2 установка (рис. 3.2) включала отбор горячего воздуха из-под укрытия головной части линейного охладителя ОП-315 и подачу воздуха двумя нитками в горелки горна и укрытие за ним [3]. В нитку подачи в горн отбирали воздух с температурой 450 – 520 °С с помощью короба [4], смонтированного над двумя первыми дутьевыми камерами охладителя в центральной части аспирационного укрытия. После очистки в батарейном циклоне воздух вентилятором ВГДН-21 подавался в горелки горна.

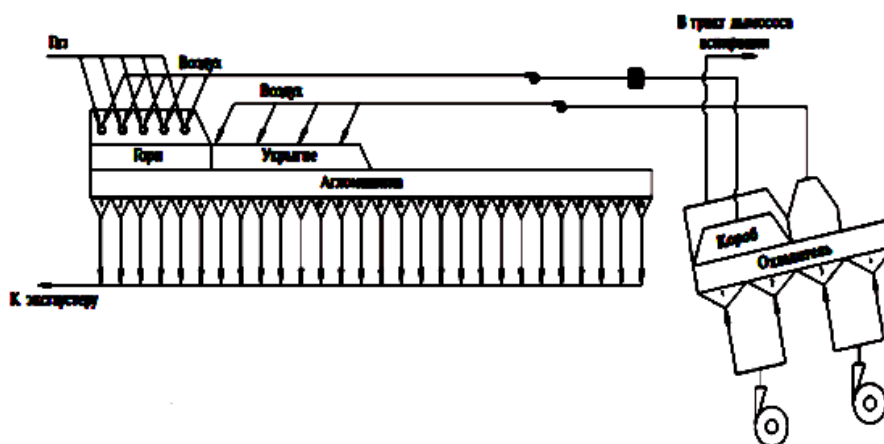


Рисунок 3.2 – Схема утилизации тепла на агломашине АКМ-312

Воздух из периферийной части укрытия с температурой 250 – 280 °С выбрасывался в аспирационную систему. В слой за горном воздух подавался дымососом ДН-22 с температурой 200 – 250 °С из укрытия, установленного над третьей дутьевой камерой охладителя.

Площадь подачи горячего воздуха, включая горн и укрытие, составила 50 % площади агломашины. Несмотря на высокие температуры воздуха, отбираемого для подачи в горн и в слой, отсутствие теплоизоляции на пылеуловителе и на воздухопроводах в зимнее время привело к большим потерям тепла и снижению температуры воздуха, особенно перед горелками горна. После завершения теплоизоляционных работ экономия газообразного и твердого топлива составила 6 кг/т агломерата. Подача нагретого воздуха в горелки горна, отапливаемого смесью коксового и доменного газов с теплотой сгорания 6 – 6,5 МДж/м³, привела к росту концентрации кислорода в продуктах сгорания и способствовала увеличению вертикальной скорости спекания в среднем на 1,6 %. Кроме того, при работе теплоутилизационных установок уменьшились подсосы холодного воздуха в объем здания, что улучшило санитарно-технические условия труда на рабочих местах, особенно в зимнее время.

Следующим перспективным направлением является рециркуляция аглогаса, суть которой, как уже упоминалось, заключается в его отборе из бора дымовой трубы и подаче в слой под специальное укрытие.

Первая опытная установка (по проекту института “Энергосталь”) была смонтирована на агломашине НПО “Тулачермет” в конце 1980-х годов. Несмотря на положительные экологические показатели (снижение выбросов в атмосферу аглогаса и пыли на 20 %, оксида углерода на 23 % и оксидов азота на 12 %), установка не получила развития вследствие выбивания аглогаса на рабочую площадку и была демонтирована.

По техническому заданию ВНИИМТа институт “Уралмеханобр” выполнил проект системы рециркуляции для шести удлиненных от 30 до 37 м машин с шириной спекательных тележек 2,8 м аглофабрики №2 Череповецкого металлургического комбината.

После предварительных испытаний на воздухе и с подачей рециркулята на крайней агломашине № 4 была увеличена длина укрытия от 15,5 до 22,0 м и выполнен рассредоточенный подвод рециркулята (рис. 3.3).

При этом получены следующие результаты. На рециркуляцию отбиралось 25,9 % объема газа, выбрасываемого нагнетателем агломашины в боров дымовой трубы с температурой 150 – 170 °С. Из-за отсутствия теплоизоляции на газоходах в слой подавался частично охлажденный рециркулят (105 – 115 °С). На соответствующую объемную величину сократились выбросы пыли в атмосферу. Концентрация оксида углерода в аглогасе уменьшилась от 0,55 до 0,40 %, выбросы в атмосферу — на 48,7 %. Сокращение выбросов оксида углерода произошло в результате дожигания в слое и снижения недожога твердого топлива в присутствии паров воды рециркулята. Эффективная теплота сгорания твердого топлива за счет

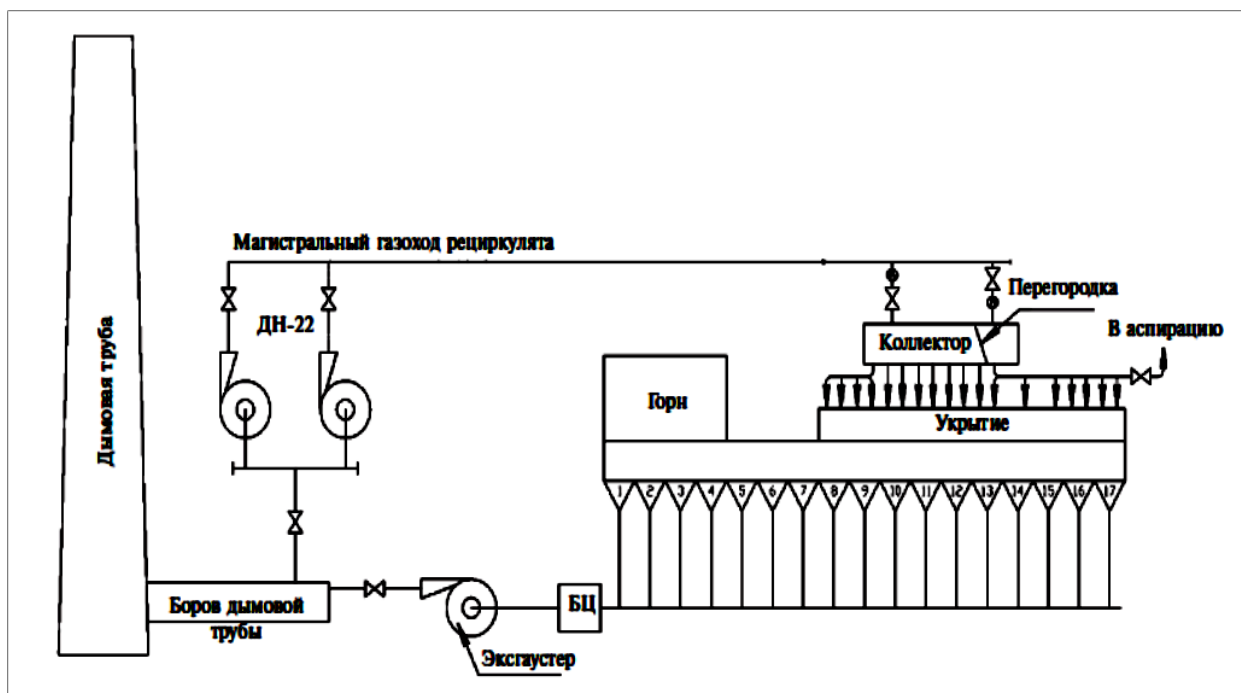


Рисунок 3.3 – Схема раздачи рециркулята на агломашине К-3-75

сокращения недожога увеличилась на 7,6 %, массовая доля мелочи в агломерате уменьшилась на 2,0 – 2,5 % (абс.).

При освоении установки имела место неравномерность распределения рециркулята по длине и ширине укрытия, и при разработке укрытия специальной конструкции представлялась возможность увеличить количество аглогаса, отбираемого на рециркуляцию.

Конструкция укрытия была разработана, однако реализация способа была приостановлена из-за ошибки в проекте в части раздачи рециркулята на остальные агломашин.

Дальнейшее развитие схема с рециркуляцией аглогаса получила на машинах МАК-138/240 аглофабрики № 2 ОАО “Мечел” по техническому заданию ВНИИМТ (проект Челябингипромеза). Это позволило уже на стадии проектирования уменьшить площадь сечения дымовых труб зоны спекания агломашин на 20 %.

Аглогас из дымовой трубы зоны спекания отбирается дымососом ДН-22 (рисунок 3.4). Выхлоп дымососа подключен к трубопроводу диаметром 1600 мм, переходящему в трубопровод переменного сечения, из которого аглогас четырьмя газоходами диаметром 800 мм подается в два укрытия специальной конструкции, установленные на рабочей площадке агломашин и размещенные над вакуум-камерами № 6 – 12 и 15 – 23.

Все газоходы теплоизолированы. На трубопроводе перед дымососом установлен дроссельный клапан для отключения подачи рециркулята, расход которого регулируется направляющим аппаратом дымососа. Каждый из газоходов диаметром 800 мм оборудован регулирующим шибером.

Дроссельный клапан, направляющий аппарат дымососа и шибер приводятся в действие электрическими исполнительными механизмами.

В укрытии под каждой врезкой газохода диаметром 800 мм над слоем спекаемой шихты установлены датчики давления рециркулята. Возле укрытий

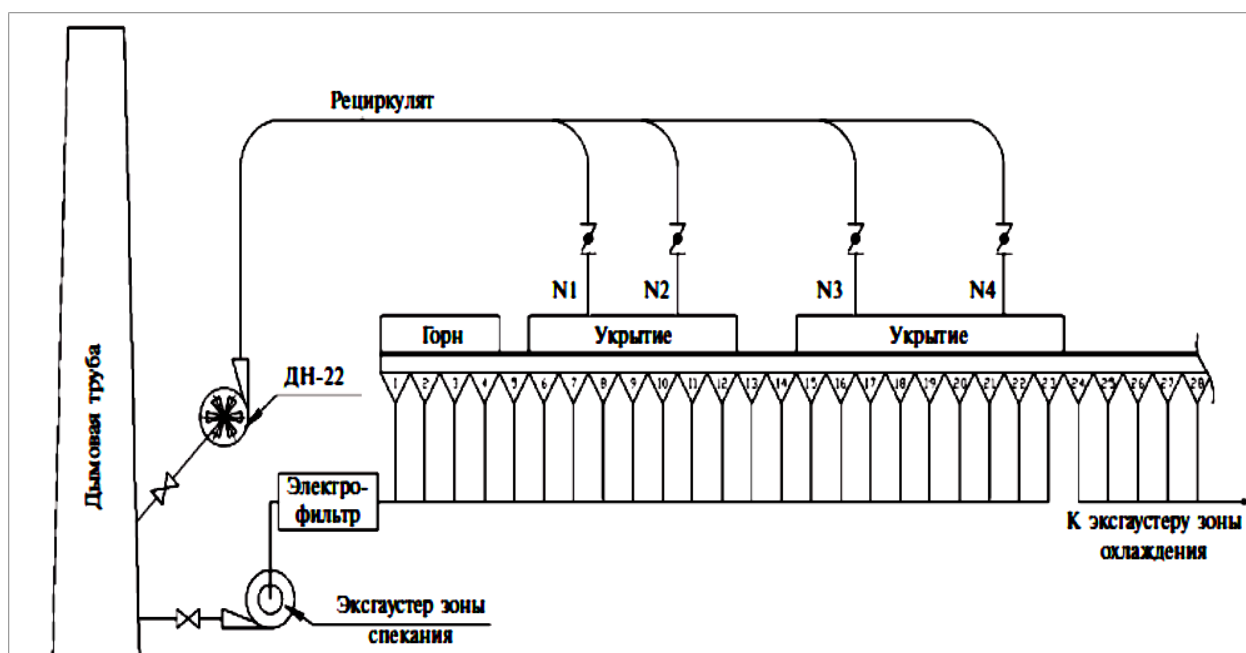


Рисунок 3.4 – Схема системы рециркуляции аглогаза на агломашине МАК-138/240

на колоннах размещены двухпороговые датчики превышения предельно допустимой концентрации (ПДК) оксида углерода на рабочей площадке.

Система управления рециркуляцией аглогаза обеспечивает отбор максимального количества рециркулята без его выбивания из укрытий на рабочую площадку. Управление производится направляющим аппаратом дымососа и шиберами на четырех газоходах по величине давления (разрежения) под укрытием в автоматическом и ручном режимах. Предусмотрены также меры безопасности при нарушении загрузки шихты, кратковременной остановке и пуске агломашин.

При срабатывании первого порога любого из датчиков, свидетельствующем о превышении половины ПДК оксида углерода в воздухе рабочей зоны, включается звуковая сигнализация и уменьшается расход рециркулята, при срабатывании второго порога - направляющий аппарат и дроссельный клапан перед дымососом закрываются. При освоении установки рециркуляции аглогаза на агломашине № 4 в 2006 г. получены следующие результаты. В слой спекаемой шихты подавался аглогаз с температурой 150 – 160 °С в количестве 28 % от объема на всасе нагнетателя. Валовые выбросы в атмосферу через дымовую трубу пыли и оксида углерода снизились также на 28 %.

Подача тепла в слой за счет температуры аглогаза и дожигания оксида углерода, эквивалентная 3,5 кг/т агломерата, улучшила тепловые условия спекания шихты в верхней части слоя. В зимнее время система рециркуляции существенно уменьшает отсос воздуха из помещения, а укрытия служат источником тепла на рабочей площадке.

Таким образом, при подаче в горелки горна нагретого при охлаждении агломерата воздуха экономия газообразного топлива эквивалентна количеству поступившего физического тепла. Увеличение концентрации кислорода в продуктах сгорания, особенно на низкокалорийном газе, сопровождается ростом вертикальной скорости спекания и производительности агломашины. Подача нагретого воздуха в слой за горном приводит к увеличению времени пребывания материала при высоких температурах и, как следствие, к снижению расхода твердого топлива в шихту и улучшению качества агломерата. На аглофабриках Карагандинского металлургического комбината экономия газообразного и твердого топлива составила 5,4 – 6,5 кг/т агломерата, производительность агломашин увеличилась на 1,6 – 2,7 %.

Рециркуляция аглогаза позволяет сократить выбросы в атмосферу технологического газа и пыли на 26 – 28 %. За счет использования физического тепла рециркулята, дожигания оксида углерода в слое и увеличения эффективной теплоты сгорания твердого топлива (уменьшения недожога) следует ожидать снижения расхода топлива в шихту на 3,6 – 3,8 кг/т агломерата и массовой доли мелочи в агломерате на 2,0 – 2,5 % (абс.).

В зимнее время работа теплоутилизационных и рециркуляционных установок уменьшает подсосы холодного воздуха в объем здания и улучшает санитарно-технические условия труда на рабочих местах.

Разработанная конструкция укрытия для раздачи горячего воздуха (рециркулята) может быть использована для подачи в слой запыленного воздуха с разгрузочной части машины на старых аглофабриках. При этом представляется возможным увеличить объем подачи не содержащего оксид углерода воздуха по сравнению с рециркулятом в 1,3 – 1,5 раза.

3.2 Исследование и разработка рециркуляции агломерационных газов на агломашине АЗФ

С целью снижения концентрации загрязняющих веществ в аглогазах, выбрасываемых в атмосферу были разработаны ряд технологических мероприятий, обеспечивающих при агломерации марганцевых и хромистых материалов также снижение расходы топлива на агломерацию.

Выполнен анализ процесса агломерации, который сопровождался промышленными исследованиями, проводимыми на действующих агломашине машины МАК-60/120 аглоцеха АЗФ. В результате этого анализа были установлены закономерности образования ряда соединений и формирования совокупности загрязняющих веществ, выбрасываемых с аглогазами в окружающую среду.

Так эмиссия оксидов азота обусловлена процессом их образования, описываемым выражением:

$$G_{NO_x}^0 = G_{NO_x}^I + G_{NO_x}^A + G_{NO_x}^T, \quad (3.1)$$

где $G_{NO_x}^I$ – количество оксидов азота, образующихся в горне агломашины;
 $G_{NO_x}^A$ – количество оксидов азота, образующихся в результате тепловых процессов, протекающих в воздухе, который поступает на агломерацию;
 $G_{NO_x}^T$ – количество оксидов азота, образующихся при термическом разложении топлива.

На основании выполненного анализа образования оксидов азота в процессе агломерации железосодержащих материалов получена эмпирическая зависимость:

$$G_{NO_x} = 5,647\sqrt{\Delta G_{O_2}} - 0,05\Delta G_{O_2} + 0,172t - 176, \quad (3.2)$$

где ΔG_{O_2} – количество кислорода израсходованного в процессе;
 t – температура аглогазов.

Эмиссия диоксида серы обусловлена процессами, отображаемыми зависимостью:

$$G_{SO_2} = f(x_1, x_2, x_3, x_4), \quad (3.3)$$

где G_{SO_2} -количество диоксида серы в агломерационном газе;
 x_1 -переменная, характеризующая окисление пирита в зависимости от температуры и содержания серы в шихте;
 x_2 -переменная, характеризующая процесс сульфатизации соединений кальция;
 x_3 -переменная, характеризующая диссоциацию сульфатов кальция от температуры;
 x_4 -переменная, характеризующая поступление соединений серы с горновыми газами, подаваемыми в агломашины ОАО “ММК” вместе с очищенным коксовым газом.

Исходя из возможности моделирования процессов агломерации послойно и допуская стационарность отдельных функциональных процессов, связанных с протеканием химических реакций соединений серы, данную зависимость можно представить в следующем виде:

$$G_{SO_2} = f(x_1) + f(x_2) + f(x_3) + f(x_4). \quad (3.4)$$

Для раскрытия этой зависимости с целью получения модели указанного процесса применен множественный регрессионный анализ по методу наименьших квадратов.

По результатам регрессионного анализа зависимости (4) в соответствии с экспериментальными данными получено выражение:

$$G_{SO_2}^0 = aG_{S_{III}}^0 + bG_{CaO}^0 + d, \quad (3.5)$$

которое конкретизируется эмпирической зависимостью:

$$G_{SO_2}^0 = 1,3124G_{S_{III}}^0 - 0,0501G_{CaO}^0 + 6,0309, \quad (3.6)$$

где a – коэффициент десульфурации сульфидной серы;

$G_{S_{III}}^0$ – содержание серы в шихте;

b – коэффициент влияния содержания соединений кальция в аглошихте на образование диоксида серы;

G_{CaO}^0 – содержание оксида кальция в шихте: доломите, известняке и извести;

d – постоянная, учитывающая особенности конструкции агломашин и технологии подготовки аглошихты аглофабрики АЗФ.

Анализ процесса горения топлива в зоне спекания аглошихты, сопровождаемый промышленными экспериментами на действующих агломашинах, позволил получить данные содержания оксида и диоксида углерода в аглогазах, отводимых по всей длине агломашин, которые приведены на рисунке 3.5.

По результатам регрессионного анализа, в соответствии с экспериментальными данными получены эмпирические зависимости, характеризующие образование: диоксида углерода, монооксида углерода (зависимость 3.8) определена для района горна вакуум - камер №№ 1 – 5, (зависимость 3.9) установлена для вакуум – камер №№ 6 – 12) и остаточное содержание кислорода в аглогазах, отводимых от вакуум – камер агломашин:

$$C_{CO_2} = 0,068x^3 - 3,7001x^2 + 55,189x - 92,158, \quad (3.7)$$

$$C_{CO} = -0,0419x^3 + 0,7925x^2 - 3,6985x + 6,99, \quad (3.8)$$

$$C_{CO} = -0,2956x + 9,5036, \quad (3.9)$$

$$C_{O_2} = -0,0014x^3 + 0,0984x^2 - 1,7256x + 22,367, \quad (3.10)$$

где C_{CO_2} , C_{CO} – концентрация диоксида и оксида углерода в отходящих аглогазах, определяемая в вакуум- камерах, г/нм³;

C_{O_2} , – концентрация кислорода в отходящих аглогазах, определяемая в вакуум-камерах, %;

x – расстояние от начала горна агломашины до рассматриваемой точки, изменяющейся в пределах от 2 до 25 метров.

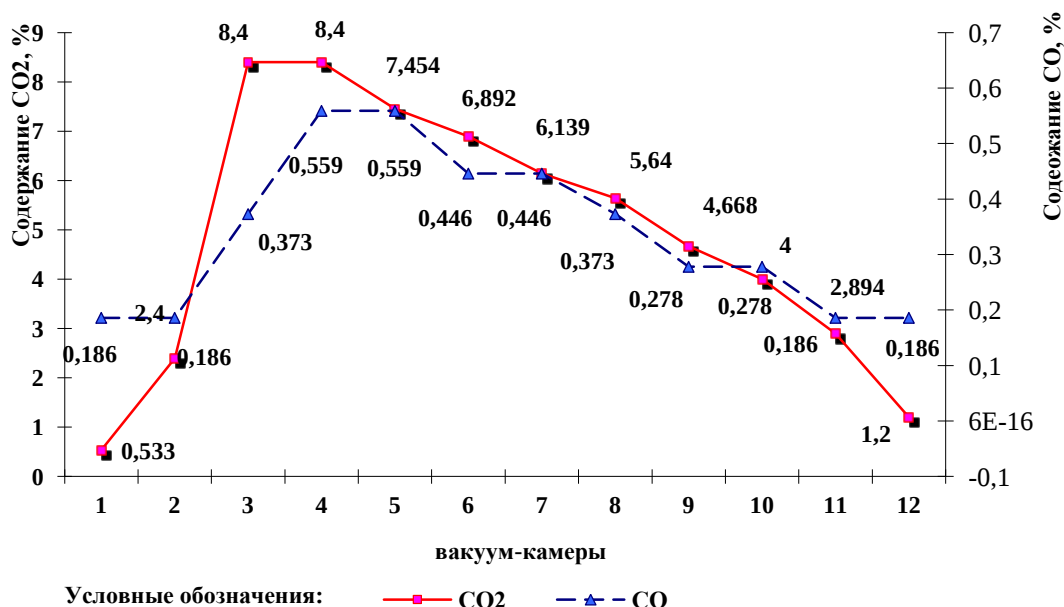


Рисунок 3.5 – Изменение объемного содержания CO₂ и CO в аглогазах, отводимых от агломашины по всем вакуум-камерам

Одновременно с этим в процессе агломерации в интервале температур 300-700 °С образуются особо опасные загрязняющие вещества, в частности, полициклические ароматические углеводороды: бенз(а)пирен, полихлордибензодиоксин, полихлордибензофуран и т.п. Одним из способов снижения количества этих веществ, выбрасываемых в окружающую среду в условиях действующих аглофабрик, является применение рециркуляции аглогазов. В результате аналитических и экспериментальных исследований получено математическое выражение для определения эффективности рециркуляции аглогазов A_{ri} каждого i -го компонента:

$$A_{ri} = \frac{(1 - R)C_{i\,az}^p}{C_{i\,az}^o}, \quad (3.11)$$

где R – степень рециркуляции аглогазов, определяемая путем математической обработки экспериментальных данных;

$C_{i\,az}^p, C_{i\,az}^o$ – соответственно, концентрация i -го компонента в аглогазах, отводимых от агломашины с их частичной рециркуляцией и без нее, г/м³.

Отличие процесса агломерации с применением рециркуляции от действующей технологии состоит в том, что в агломерируемый слой подается

смесь атмосферного воздуха и рециркулята, содержащая пониженное количество кислорода, увеличенное количество оксидов углерода, азота, серы, паров воды и твердых веществ, неуловленных системами очистки аглогазов. Следовательно, основным ограничением, определяющим максимально возможную степень рециркуляции аглогазов, является создание условий, при которых сохраняется последовательность протекания окислительно-восстановительных процессов, характерных для основного периода агломерации, определяющим фактором является содержание кислорода, подаваемого с рециркулятом. При этом количество кислорода, подаваемого с рециркулятом, определяется по выражению:

$$G_{O_2ex}^p = R \cdot C_{O_2az} \cdot Q_{az}^p + C_{O_2am} \cdot Q_{am}^p, \text{ г/с}, \quad (3.12)$$

где Q_{az}^p, Q_{am}^p – расход рециркулята и воздуха, подаваемых на агломерацию, м³/с.

$C_{O_2az}^p, C_{O_2am}$ – соответственно, концентрации кислорода, подаваемого с рециркулятом и газовоздушной смесью в агломашину, г/м³;

Расчетами, выполненными на основании экспериментальных исследований, установлено, что количество кислорода в газовоздушной смеси, подаваемой на рециркуляцию, должно быть не менее 16%, а степень рециркуляции не должна превышать 27%.

Анализ газодинамических и теплообменных процессов, протекающих в слое спекаемой шихты при рециркуляции аглогазов, позволил установить, что определяющим фактором в этом процессе является величина вертикальной скорости спекания. При этом теплоемкость газовоздушной смеси, подаваемой на рециркуляцию, можно определить по формуле:

$$c_z^p = (1-R) \sum_{i=1}^n c_{pi} g_i + R \sum_{i=1}^n c_{pi}^p g_i^p, \quad (3.13)$$

где c_z^p, c_{pi}, c_{pi}^p – теплоемкость соответственно: газовоздушной смеси, подаваемой на агломерацию с применением рециркуляции; компонента входящего в состав газвоздушной смеси в штатном режиме, компонента входящего в состав рециркулята, кДж/кг⁰С;

g_i, g_i^p – доля соответствующих компонентов газовоздушной смеси.

Коэффициент, характеризующий изменение вертикальной скорости спекания $v_{сп}$ в случае применения способа рециркуляции, можно определить по выражению:

$$v_{cn} = \frac{U_{cn}^p}{U_{cn}} = 1 + R \left(\frac{\sum_{i=1}^n c_{pi}^p g_i^p}{\sum_{i=1}^n c_{pi} g_i} - 1 \right), \quad (3.14)$$

где U_{cn}, U_{cn}^p -соответственно, вертикальная скорость спекания шихты при работе агломашины в штатном режиме и с применением рециркуляции, м/с.

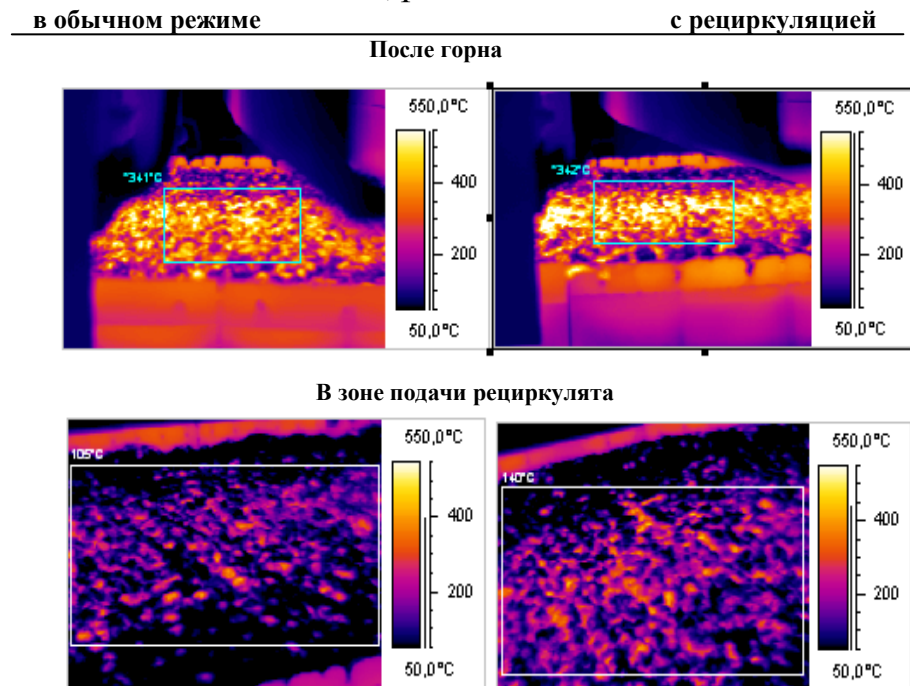
В этом случае температура газовой смеси, подаваемой на поверхность спекаемого слоя t^p при рециркуляции, определяется по формуле:

$$t^p = \frac{Rc_{az}^p t_{az}^p + (1-R)c_{am} t_{am}}{Rc_{az}^p + (1-R)c_{am}}, \quad (3.15)$$

где c_{am}, c_{az}^p -соответственно, удельные теплоемкости атмосферного воздуха и аглогаза, кДж/кг⁰С;

t_{am}, t_{az}^p -соответственно, температуры атмосферного воздуха и аглогаза подаваемого на рециркуляцию, ⁰С.

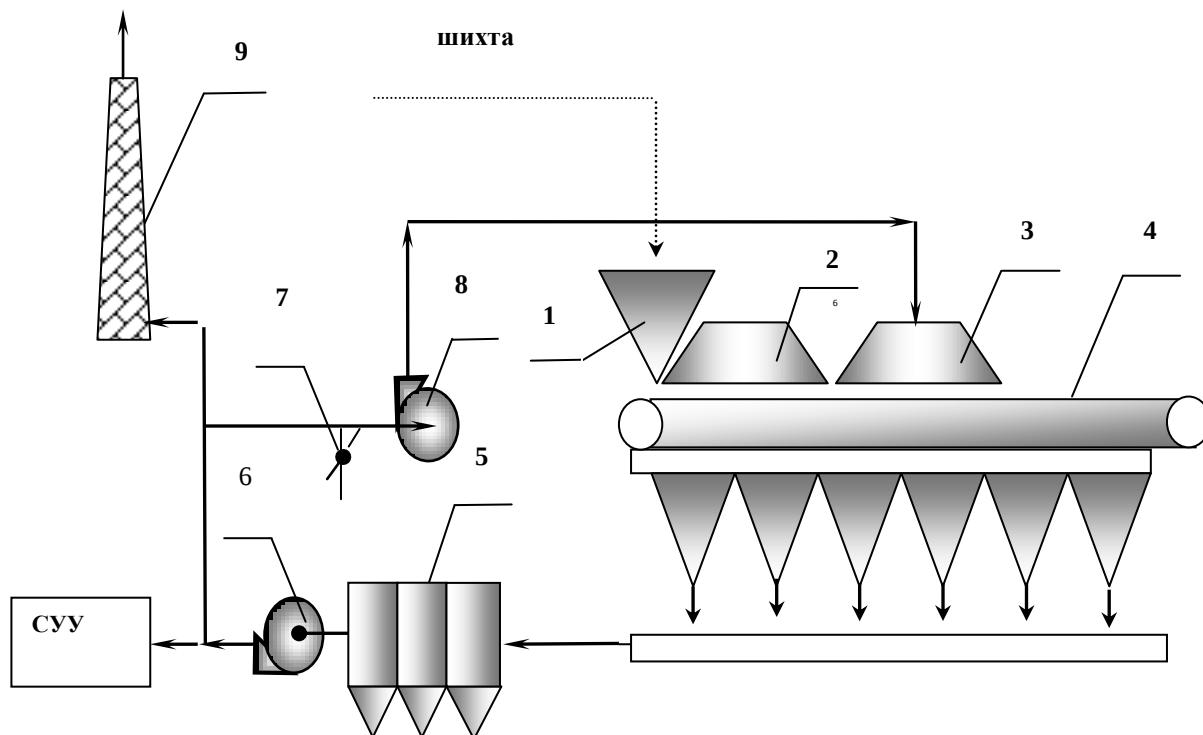
Экспериментально в условиях действующей аглофабрики АЗФ с применением тепловизора «ThermaCAM – Р65» FLIRsystems были определены значения температуры поверхности агломерата при работе агломашины №12 в обычном режиме и с применением селективной системы рециркуляции аглогазов, которые приведены на рисунке 3.6. Температура поверхности агломерата в зоне спекания агломашины, работающей по :



Риснок 3.6 – Термоснимки поверхности агломерата в различных зонах агломашины, работающей в штатном режиме и с применением рециркуляции аглогазов

По технико-экономическим и эксплуатационным показателям к внедрению в производство на действующих аглофабриках предложена система рециркуляции с отбором части аглогазов после эксгаустера (рисунок 3.7).

Для предотвращения выбросов загрязняющих веществ в рабочие помещения спекательных отделений аглофабрик, использующих систему рециркуляции, разработана конструкция укрытия той части зоны спекания, в которую подается рециркулянт.



1- устройство для загрузки шихты; 2- зажигательный горн; 3-укрытие; 4 – аглолента; 5- батарейный циклон; 6- эксгаустер; 7 – клапан подачи воздуха; 8 - вентилятор; 9 - дымовая труба

Рисунок 3.7 – Система рециркуляции аглогазов, с отбором их после эксгаустера

3.3 Разработка способа агломерации с рециркуляцией агломерационных газов

Целью способа является сокращение выбросов вредных веществ в атмосферу, улучшение качества агломерата и снижение тепловых затрат на его производство.

Поставленная цель достигается тем, что в известном способе, на аглоленте формируют зону частичного охлаждения аглоспека, рециркулирующийся газ получают путем смешивания газов зоны спекания и зоны частичного охлаждения, а полученный рециркулянт распределяют по зоне спекания и по зоне охлаждения, при этом процесс охлаждения ведут таким

образом, чтобы максимальная температура спека, сходящего с аглоленты составляла 0,6-0,7 температуры начала его плавления.

Формирование на агломашине зоны частичного охлаждения аглоспека и подача на нее рециркулянта позволяет сократить выбросы вредных веществ в атмосферу за счет увеличения объема использования рециркулянта (поскольку скорость фильтрации воздуха через слой агломерата в зоне охлаждения в 1,5-2 раза выше, чем в зоне спекания), а также за счет увеличения полноты использования в качестве активного поглотителя тонкодисперсной пыли высокотемпературной части аглоспека.

Получение рециркулянта путем смешивания газов из зоны спекания и зоны охлаждения позволяет сократить выбросы вредных веществ в атмосферу и снизить затраты тепла на производство агломерата за счет повышения температуры и влагосодержания рециркулянта, обеспечивающих увеличение эффективности дожигания монооксида углерода и повышение максимальной температуры в спекаемом слое.

Под температурой начала плавления спека подразумевается температура, при которой в указанной многокомпонентной системе появляется жидкая фаза. Температуру начала плавления (T_n) с достаточной точностью можно определить по формуле:

$$T_n = 1087,85 + 2,774 Fe_2O_3 - 0,507 FeO - 6,931 CaO - 1,095 SiO_2 + \quad (3.16) \\ + 3,943 Al_2O_3 + 8,974 MgO,$$

где Fe_2O_3 , FeO , CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , MgO - концентрация оксидов, мас.%, пересчитанная на шестикомпонентную систему (Каплун Л. И. Температура и энтальпия плавления шихтовых железорудных материалов. Изв. АН СССР "Металлы", 1989, N 4, с.5-10).

Ведение процесса спекания и охлаждения таким образом, чтобы максимальная температура аглоспека, сходящего с аглоленты, составляла 0,6-0,7 температуры начала его плавления, позволяет снизить тепловые затраты, уменьшить выбросы вредных веществ в атмосферу за счет достижения монооксида углерода в высокотемпературном нижнем слое, улучшить качество агломерата (уменьшить содержание мелочи и увеличить его прочность) за счет поглощения дисперсных частиц пыли, расплавленной нижней частью спека, которые являются дополнительными центрами кристаллизации.

Выбор максимальной температуры аглоспека, сходящего с аглоленты 0,6-0,7 температуры начала плавления связан с тем, что при температуре выше указанной сохраняется вязко-пластичное состояние спека, позволяющее снижать содержание пыли в газе за счет активного поглощения тонких пылевидных фракций рециркулянта, чего не происходит при более низких температурах (ниже 0,6-0,7 температуры начала плавления). Без организации зоны охлаждения максимальная температура спека, сходящего с аглоленты, как правило, выше 0,6-0,7 температуры начала плавления, что снижает фильтрационные возможности слоя.

Таким образом, заявленная совокупность признаков позволяет обеспечить сокращения выбросов вредных веществ в атмосферу, улучшить качество агломерата и снизить тепловые затраты на его производство.

Способ осуществляется следующим образом.

Основными компонентами шихты аглопроизводства АЗФ в период испытаний (Химический состав производимого в период испытаний агломерата (%): Fe = 57,6; Fe₂O₃ = 68,6; FeO = 12,3; CaO = 8,94; SiO₂ = 4,54; Al₂O₃ = 1,05; MgO = 3,07.

Агломерационную шихту, составленную (по расходу топлива) с учетом использования рециркулята, загружают на агломашину, зажигают и спекают. Образующийся аглоспек охлаждают на аглоленте до достижения максимальной температуры не более 0,6 – 0,7 температуры начала плавления.

Температуру начала плавления спека определяли с помощью формулы Л.И.Каплуна по химическому составу агломерата. Для агломерата опытного периода T_н составила 1240°C.

Поддержание максимальной температуры спека на сходе с аглоленты на уровне (0,6 – 0,7) T_н - 740 – 870°C осуществляли с помощью заранее установленной зависимости между максимальной температурой спека и температурой отходящих газов в последней вакуум-камере агломашин.

Часть отходящего агломерационного газа после очистки отбирают из общего потока и направляют на поверхность аглоспека в зону спекания и сформированную зону охлаждения. При этом газ зоны охлаждения добавляется к отходящему газу зоны спекания, повышая температуру и содержание кислорода в общем объеме рециркулята. Отходящие газы агломашин после отбора рециркулята направляют в дымовую трубу.

Сравнительные испытания выполнены на промышленной агломашине АЗФ – филиале АО «ТНК «Казхром»

Результаты испытания по предлагаемому способу и по существующей технологии приведены в таблице.

Приведенные в таблице результаты показывают, что снижение максимальной температуры спека в зоне охлаждения ниже установленной в заявленном способе величины, приводит к уменьшению эффекта рециркуляции газа из-за исчезновения зоны вязкопластичного состояния спека, обладающей повышенной поглотительной способностью по отношению к тонким фракциям пыли.

Полученные результаты сравнительных испытаний показывают, что предлагаемый способ агломерации с рециркуляцией отходящих газов позволяет:

- уменьшить валовые выбросы монооксида углерода на 109%;
- уменьшить валовые выбросы пыли на 11,6%;
- снизить расход твердого топлива (тепловые затраты) на спекание на 3,2%;
- улучшить качество агломерата за счет снижения содержания мелочи (0,5 мм) в нем на 2,9% (абс.);

– увеличить производительность агломашины на 0,8%.

Таким образом, заявляемый способ позволяет существенно улучшить технико-экономические показатели аглопроцесса и сократить выбросы вредных веществ в атмосферу.

Таблица 3.1 – Техничко-экономические показатели различных вариантов рециркуляции аглогазов и по существующей технологии

Показатели	По существующей технологии	Предлагаемый способ	Режим с охлаждением до 0,4-0,5 Т _{пл}
Количество газа, м ³ вл.газа/с: после нагнетателя	77,5	81,7	82,9
рециркулянта	17,1	21,2	22,9
выбрасываемого в атмосферу	60,4	60,5	60,0
Состав газа, %:			
CO ₂	3,71	3,96	3,98
O ₂	17,52	17,28	17,25
CO	0,45	0,40	0,39
Пыль, г/м ³	0,17	0,15	0,16
Валовые выбросы, кг/ч:			
CO	1141	1016	984,4
пыли	34,5	30,5	32,2
Удельные выбросы, кг/т. агл.			
CO	14,6	12,9	13,9
пыли	0,44	0,39	0,46
Производительность агломашины, т/ч	78,1	78,8	70,6
Расход твердого топлива, кг/т	66,2	64,1	64,2
Массовая доля мелочи в агломерате, %	14,5	11,6	11,5

3.4 Интенсификация процессов теплообмена при агломерации марганцевого концентрата

С целью интенсификации процесса тепломассообмена в зоне спекания аглошихты для снижения выброса загрязняющих веществ при производстве агломерата разработана система акустической обработки зоны спекания путем воздействия акустическими колебаниями, создаваемыми газоструйными стержневыми излучателями.

В этом случае ведущую роль выполняют процессы, протекающие в пограничных слоях пористой структуры спекаемой шихты. Решая систему уравнений Прандля, характеризующих течение газа в пограничных слоях при числе Маха $M \ll 1$, получим значения продольной и поперечной составляющих скорости пульсирующего газового потока в пограничных слоях, описываемых системой уравнений:

$$v_{x1} = U_0 \cdot \left[\cos(\omega t - kx) - \exp\left(-\frac{z}{\delta}\right) \cdot \cos\left(\omega t - kx - \frac{z}{\delta}\right) \right]$$

$$v_{z1} = \frac{U_0 \cdot \delta_k}{2} \cdot \left\{ \frac{z}{\delta} \cdot \sin(\omega t - kx) - \sin(\omega t - kx) + \cos(\omega t - kx) + \right. \\ \left. + \exp\left(-\frac{z}{\delta}\right) \cdot \left[\sin\left(\omega t - kx - \frac{z}{\delta}\right) - \cos\left(\omega t - kx - \frac{z}{\delta}\right) \right] \right\} \quad (3.17)$$

где δ - толщина акустического пограничного слоя, определяемая как:

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot \mu}{\omega \cdot \rho}}, \quad (3.18)$$

где μ – динамическая вязкость газа;

ρ – плотность газа;

U_0 – скорость набегающего потока газа м/с;

$$\delta_k = \frac{2\pi \cdot \delta}{\lambda} = \sqrt{\frac{2 \cdot \mu \cdot \omega}{\rho \cdot c^2}} \ll 1. \quad (3.19)$$

где δ_k - безмерный параметр;

$\omega = 2\pi f$ – циклическая частота колебаний, с⁻¹;

f – частота колебаний, с⁻¹;

$k = 2\pi/\lambda$ – волновой вектор, м⁻¹;

λ – длина волны, м.

Таким образом, влияние колеблющегося потока на теплообмен при турбулентном режиме течения обусловлено:

- во-первых, изменением коэффициента турбулентной теплопроводности посредством воздействия вынужденных колебаний на энергетический спектр турбулентных пульсаций;

- во-вторых, вынужденные колебания продольной скорости генерируют колебания поперечной скорости потока, что приводит к дополнительному поперечному переносу тепла.

При проведении промышленных испытаний три таких излучателя были установлены непосредственно на входе в зону спекания агломашины. Эти испытания показали, что акустическая обработка зоны спекания обеспечивает снижение выбросов: СО на 16%, NO_x на 17%.

Результаты аналитических и экспериментальных исследований, подтвержденные промышленными испытаниями, проведенными на аглофабрике АЗФ по применению технических средств и способов снижения выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду. С этой целью была разработана конструкция и изготовлен опытно-промышленный образец

генератора акустических колебаний, состоящий из: волновода, диффузора и электродинамической сирены, оснащенной электроприводом и системой подачи сжатого воздуха в рабочую камеру.

Разрушение слоя за счет резонансных колебаний в очищаемых элементах при распространении звуковой волны, давление в которой P определяется по формуле:

$$P = P_0 \cdot \sin(\omega \cdot t - kx) \quad (3.20)$$

связано с возбуждением в них собственных колебаний, описываемых уравнением:

$$\rho_m \cdot h \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + \frac{h^3 E}{12(1 + \sigma^2)} \cdot \frac{\partial^4 z}{\partial x^4} = 0 \quad (3.21)$$

решение, которого имеет в вид:

$$z(t, x) = \sum_{m=1}^{\infty} \Phi_m(t) \cdot \sin \frac{m \cdot \pi \cdot x}{l} \quad (3.22)$$

где

$$\begin{aligned} \Phi(t) = & A_{0m} \cdot \exp(-\alpha \cdot t) \cdot \sin(\sqrt{\omega_m^2 - \alpha^2} \cdot t + \varphi_{0m}) + \\ & + A_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_1 + \gamma_m) \end{aligned} \quad (3.23)$$

Решение этого уравнения для установившегося процесса в случае резонанса будет:

$$z_j(t, x) = A_j \sin(\omega \cdot t + \varphi_j + \gamma_j) \cdot \sin \frac{j \cdot \pi \cdot x}{l} \quad (3.24)$$

где

$$A_j = \frac{\sqrt{2} \cdot P_0 \sqrt{1 - (-1)^j \cos 2\pi \cdot \frac{l}{\lambda}}}{\rho_m \cdot h \cdot \pi \cdot (j - \frac{4l^2}{j\lambda_2}) \cdot \alpha \cdot \omega} \quad \text{при} \quad \frac{2\pi}{\lambda} \neq \frac{j\pi}{l} \quad (3.25)$$

$$A_j = \frac{P_0}{2 \cdot \rho_m \cdot h \cdot \alpha \cdot \omega} \quad \text{при} \quad \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{j\pi}{l} \quad (3.26)$$

Промышленные испытания этой системы, проведенные при давлении сжатого воздуха 0,2 МПа и частоте звуковых колебаний, изменявшихся от 40 до 250 Гц, показали возможность разрушения дисперсной структуры слоев пыли, сформировавшихся на газораспределительной решетке и осадительных электродах электрофильтра. Это позволило исключить первую ступень пылеулавливания, перейдя к одноступенчатой очистке в электрофильтре аспирационной системы и обеспечить дополнительное улавливание выбросов пыли от работы агломашин аглофабрики АЗФ.

4 Разработка и изготовление зажигательного горна агломашины с комбинированной системой отопления

4.1 Исследование процессов теплообмена и фильтрации газов при агломерации

Основная задача нагрева шихты от внешнего источника — создание первоначальной тепловой волны, т. е. зажигание твердого топлива в верхней части слоя шихты и прогрев на глубину, обеспечивающую в дальнейшем воспламенение топлива в нижележащих частях слоя. Это осуществляется путем просасывания через слой продуктов сгорания топлива, которое сжигается в горне.

Нагрев шихты от внешнего источника тепла принято характеризовать следующими показателями [1]: температурой продуктов сгорания на входе в слой шихты (t_r); продолжительностью зажигания ($\tau_{зж}$, мин); интенсивностью зажигания, отнесенной к площади поперечного сечения горна (I , кДж/(м²·мин)); количеством тепла, полученного слоем от внешнего источника (Q' , кДж/м²); удельным расходом тепла на зажигание ($q_{зж}$, Дж/т агломерата).

Температура продуктов сгорания на входе в слой при зажигании шихты составляет обычно 1150 – 1300 °С.

Для работающего агрегата продолжительность зажигания зависит от соотношения между длиной горна (l_g) и длиной зоны спекания агломашины (l) и обратно пропорциональна скорости движения спекательных тележек (U_l , м/мин):

$$\tau_{зж} = l/U_l \quad (4.1)$$

Интенсивность зажигания

$$I = 60c_z \cdot t_z \cdot w_z \quad (4.2)$$

прямо пропорциональна скорости фильтрации на входе в слой (w_g , м³/(м²·с)) и теплоемкости продуктов сгорания (c , кДж/(м³·К)).

Количество тепла, полученное слоем от внешнего источника при зажигании

$$Q' = I \cdot \tau_{зж} \quad (4.3)$$

Удельный расход тепла на зажигание

$$q_{зж} = 1000Q'/(H \cdot k_{ш} \cdot \rho_{ш}) = 6 \cdot 10^4 c_z \cdot t_z \cdot w_z \cdot \tau_{зж}/(H \cdot k_{ш} \cdot \rho_{ш}) \quad (4.4)$$

где H – высота слоя шихты, м;

$k_{ш}$ – выход годного агломерата из влажной шихты, кг/кг;

$\rho_{ш}$ – плотность (насыпная масса) шихты, кг/м³.

По обобщенным в работе [1] данным зарубежных исследователей, удовлетворительная прочность агломерата в верхнем слое обеспечивается при $Q'=45-50$ МДж/м² и $I=33-42$ МДж/(м²·мин). При этом продолжительность зажигания, включающая нагрев шихты до температуры воспламенения твердого топлива и его выгорание в верхней части слоя, должна составлять 1,2 – 1,5 мин. По данным отечественных исследователей [2], $Q'=44-76$ МДж/м² и $q_{зж}=145-170$ МДж/т агломерата для неофлюсованных шихт, $Q'=75-92$ МДж/м² — для офлюсованных шихт, $\tau_{зж}=1,0-1,5$ мин.

При спекании шихты в слое высотой 150 – 250 мм на отечественных агломашинах продолжительность зажигания составляла менее 1 мин [1; 2]. Этим объясняются положительные результаты, полученные при установке за горном дополнительных газогорелочных устройств, а в последующем и при внедрении горнов для комбинированного нагрева шихты (КНШ). Подача в слой после зажигания нагретого воздуха или продуктов сгорания с содержанием 8 – 10 % свободного кислорода позволяет обеспечить максимальный уровень температур и соответственно одинаковые условия образования агломерата по всей высоте слоя. Повсеместная установка удлиненных горнов для КНШ привела к сокращению расхода твердого топлива в шихту и содержания мелочи в агломерате, увеличению выхода годного и производительности агломашин, однако при этом примерно вдвое возрос удельный расход тепла на зажигание, что в среднем по аглофабрикам черной металлургии составило 255, 290 и 268 МДж/т агломерата. [3].

В условиях непрерывного роста цен на энергоносители появилась необходимость в горне нового образца, позволяющем при низком удельном расходе тепла, характерном для горнов с длительностью зажигания около 1 мин, обеспечить зажигание шихты и частично дополнительный нагрев слоя.

При модернизации работающих агломашин и при проектировании новых, как правило, известными (заданными) величинами являются характеристики шихты, высота слоя, вид газообразного топлива для зажигания, ширина тележек и удельный расход тепла на зажигание и подогрев спека. Для разработки конструкции горна необходимо определить лишь его длину, т. е. длительность пребывания спека под горном.

Если принять во внимание, как было уже показано, что непосредственно для зажигания шихты необходимо 1 – 1,5 мин, то общая продолжительность пребывания слоя под горном при режиме КНШ может быть определена из условия равенства поставляемого горном тепла и энтальпии продуктов сгорания путем преобразования уравнения:

$$\tau_{зж} = q_{зж} = H \cdot k_{ш} \cdot \rho_{ш} / (6 \cdot 10^4 c_z \cdot t_z \cdot w_z) \quad (4.5)$$

Продолжительность зажигания включает нагрев исходной шихты до температуры воспламенения твердого топлива, образования зоны его горения и

частично дополнительный нагрев спека, который осуществляется главным образом под козырьком, примыкающим к горну и реализуется за счет теплообмена между спеком и козырьком. Считается, что режим дополнительного нагрева спека близок к режиму основного периода спекания и характеризуется одинаковой с ним скоростью фильтрации.

Для определения скорости фильтрации воздуха через слой используется величина удельного расхода воздуха (V_B) на процесс спекания, который рассчитывается на основании следующих предпосылок.

Проходящий через агломерируемый слой воздух расходуется на горение углерода топлива шихты (V_C^{zop}), окисление двухвалентного железа (V_{Fe0}), окисление сульфидной серы (V_S) и горение топлива в зажигательном горне (V_z). Кроме того, в обычных условиях агломерации железорудных материалов имеется избыточный воздух ($V_{изб}$) который переходит в агломерационный газ, не участвуя в перечисленных химических процессах. Таким образом, можно записать:

$$V_B = V_C^{zop} + V_{Fe0} + V_S + V_z + V_{изб} \quad (4.6)$$

Расход воздуха на окисление топлива в зажигательном горне, монооксида железа и серы шихты может быть найден по стехиометрическим соотношениям их химического взаимодействия с кислородом:

$$V_{Fe0} = (4,76/9\rho_{O_2})k_{ш}\rho_{ш}(FeO'_{ш} - FeO'_a); \quad (4.7)$$

$$V_S = (0,0476/9\rho_{O_2})k_{ш}\rho_{ш}(S'_{ш} - S'_a); \quad (4.8)$$

$$V_z = 0,0476k_{ш}\rho_{ш}[0,5(H_2 - CO) + CH_4 + 3C_2H_4 + 1,5H_2S - O_2] \cdot V_z^T. \quad (4.9)$$

где FeO' и S' — содержание в шихте без возврата и в агломерате;
 V_z^T — расход топлива в горне, м³/т агломерата.

Выражение для расчета расхода воздуха на горение углерода шихты (м³/м³_ш) с учетом химической неполноты его горения и избытка воздуха имеет вид

$$V_C = V_C^{zop} + V_{изб} = [37,5 + (\beta - 0,375)O''_a]B_C / [0,375(21 - O''_2)\rho_{O_2}\beta] \quad (4.10)$$

где β — стехиометрический фактор, кг углерода на кг O₂;
 O''_2 — содержание кислорода в продуктах сгорания углерода шихты, %;
 ρ_{O_2} — плотность кислорода при нормальных условиях, кг/м³;
 B_C — объемная концентрация горючего углерода в слое шихты, кг/м³.

При статистической обработке данных промышленных исследований было установлено, что средняя величина стехиометрического фактора при агломерации различных по составу шихт равна $0,426 \pm 0,008$, а зависимость

между содержанием кислорода и продуктах сгорания и концентрацией горючего углерода в слое B_C в диапазоне ее изменения от 40 до 70 кг/м³ удовлетворительно описывается уравнением

$$O_2'' = 21 - 1/(2,647/B_C + 0,0235) \quad (4.11)$$

После соответствующей подстановки выражение для расчета расхода воздуха на горение углерода шихты принимает вид

$$B_C = 448,2 + 3,76B_C \quad (4.12)$$

где $U = H \cdot U_{\text{л}}/I$ – вертикальная скорость спекания, мм/мин;

По величине удельного расхода воздуха рассчитывают скорость фильтрации через слой и затем коэффициент гидравлического сопротивления A :

$$w_g = 0,167 \cdot 10^{-4} V_g \cdot U \quad (4.13)$$

$$A = \Delta P_{\text{сл}} / (H \cdot w_g^{1,59}) \quad (4.14)$$

с учетом того, что сопротивление составляет примерно 95 % величины разрежения в вакуум-камерах ($\Delta P_{\text{вк}}$)

В режиме образования зоны горения твердого топлива имеет место дефицит кислорода и продуктах сгорания, что снижает скорость перемещения фронта горения по глубине слоя. В связи с этим скорость фильтрации газа через слой при зажигании должна иметь значение, при котором не происходит рассогласования между фронтами теплопередачи и горения топлива.

$$w_{\text{зж}} = 0,854 \left(1,420 - \frac{4,5}{O_2} + \frac{6,74}{O_2^2} \right) \left(\frac{1}{1,108 - 0,204/C_{\text{ш}}} \right) \cdot w_{\text{в}} \quad (4.15)$$

По скорости фильтрации в режиме зажигания и коэффициенту гидравлического сопротивления слоя определяется сопротивление слоя в режиме зажигания ($\Delta P_{\text{зж}}$). Затем рассчитывается величина дросселирования вакуум-камер в режиме зажигания:

$$\Delta P_{\text{др}} = \Delta P_{\text{вк}} - \Delta P_{\text{зж}} \quad (4.16)$$

В отличие от основного периода спекания исходная шихта обладает существенно большей газопроницаемостью. По литературным данным коэффициент гидравлического сопротивления на исходной шихте в 1,7 - 1,8 раза меньше, чем в режиме спекания:

$$\xi_{исх} = A/(1,7 - 1,8) \quad (4.17)$$

При этом сопротивление слоя исходной шихты

$$\Delta P_{исх} = \xi_{исх} \cdot H \cdot w_{зж}^{1,59} \quad (4.18)$$

а величина дросселирования первой вакуум-камеры

$$\Delta P_{др1} = \Delta P_{вк} - \Delta P_{исх} \quad (4.19)$$

Дросселирование первой вакуум-камеры и плавный нагрев исходной шихты предотвращают усадку слоя и положительно влияют на газопроницаемость шихты в основном периоде спекания.

Схема расчета скоростей фильтрации и величины дросселирования вакуум-камер приведена на рисунке 4.1. Дросселирование целесообразно осуществлять в две ступени. В нижней части патрубка вакуум-камеры установить стационарное сужающее устройство, рассчитанное на величину минимально необходимого снижения разрежения, в верхней части патрубка - мотыльковый шибер для поддержания разрежения в вакуум-камере в автоматическом режиме.

4.2 Опыт разработки и освоения зажигательных горнов агломерационных машин

В соответствии с изложенными выше принципами и использованием расчетной методики во ВНИИМТе был выполнен расчет и изготовлен зажигательный горн агломерационной конвейерной машины МАК-60/120, предназначенной для спекания пыли и мелочи марганцевых и хромовых руд на Аксуском заводе ферросплавов – филиале АО «ТНК «Казхром» (Республика Казахстан).

Согласно задания:

- производительность агломашины при использовании марганцевого концентрата 52,7 т/ч; при хромовом концентрате – 42,2 т/ч;
- топливо для сжигания в горне:
- ферросплавный газ (состав объемный, % - CO – 70; H₂ – 7,0; CH₄ – 1,0; CO₂ – 12,0; N₂ – 3,5; H₂O – 5,0). Теплота сгорания низкая – 2379 ккал/м³ и
- дизельное топливо с теплотой сгорания 10150 ккал/кг;
- сжигание топлива должно производиться отдельно.
- скорость движения спекательных тележек 0,52 – 0,69 м/мин;
- максимальная температура поверхности слоя шихты – 1350°C;
- горн должен располагаться над первыми тремя вакуум-камерами;
- ширина тележки – 3 м, длина вакуум-камеры – 2 м.

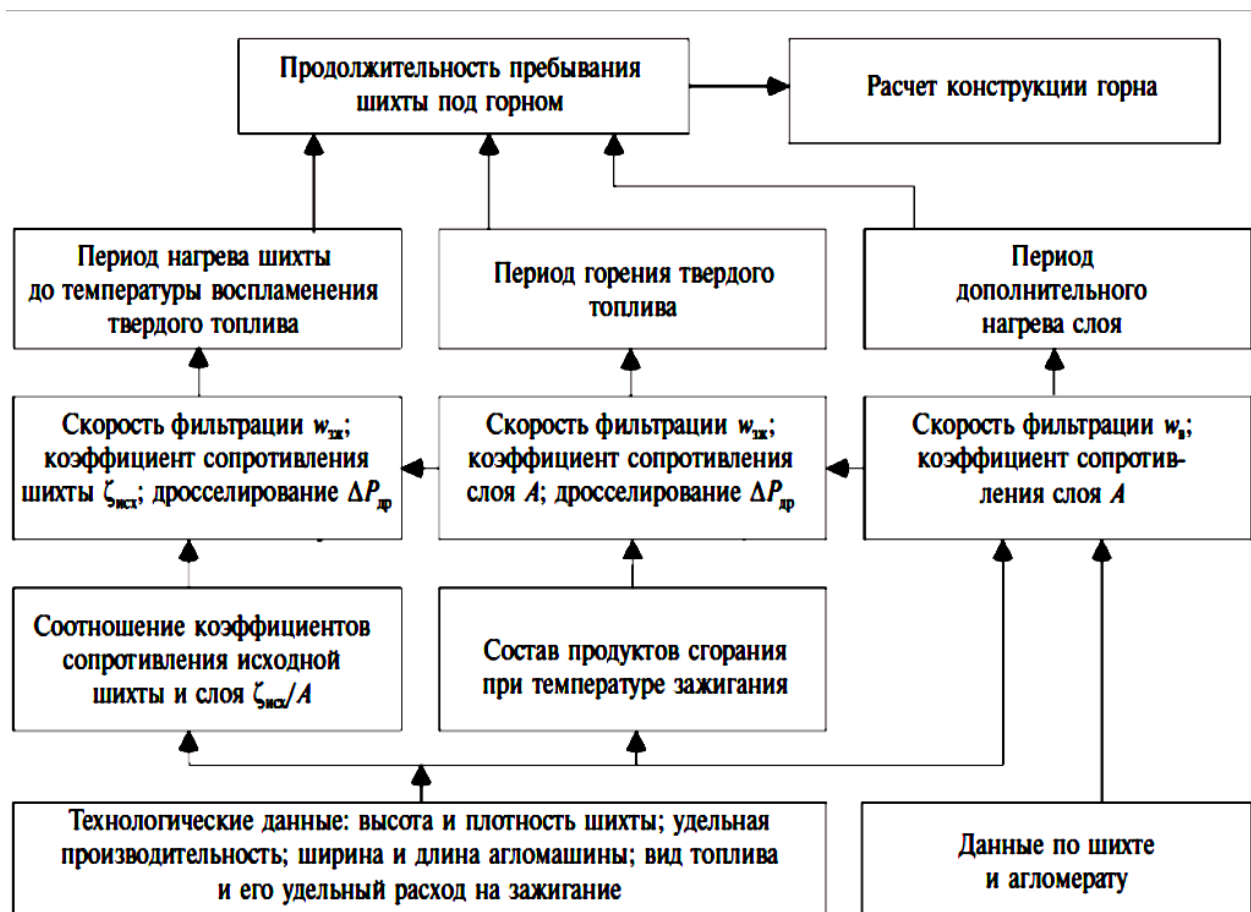


Рисунок 4.1 – Схема расчета скоростей фильтрации и величины дросселирования воздуха камер

Значения расхода воздуха и выхода продуктов сгорания в интервале температур горновых газов от 1250 до 1350°C приведены в таблице 4.1.

При условии скорости фильтрации горновых газов через слой от 0,15 до 0,25 м/с и наличии дросселирования вакуум-камер расход ферросплавного газа на горн составляет 1140 м³/ч; дизельного топлива – не более 300 кг/ч.

Ниже изложены основные технические решения, примененные при разработке горна.

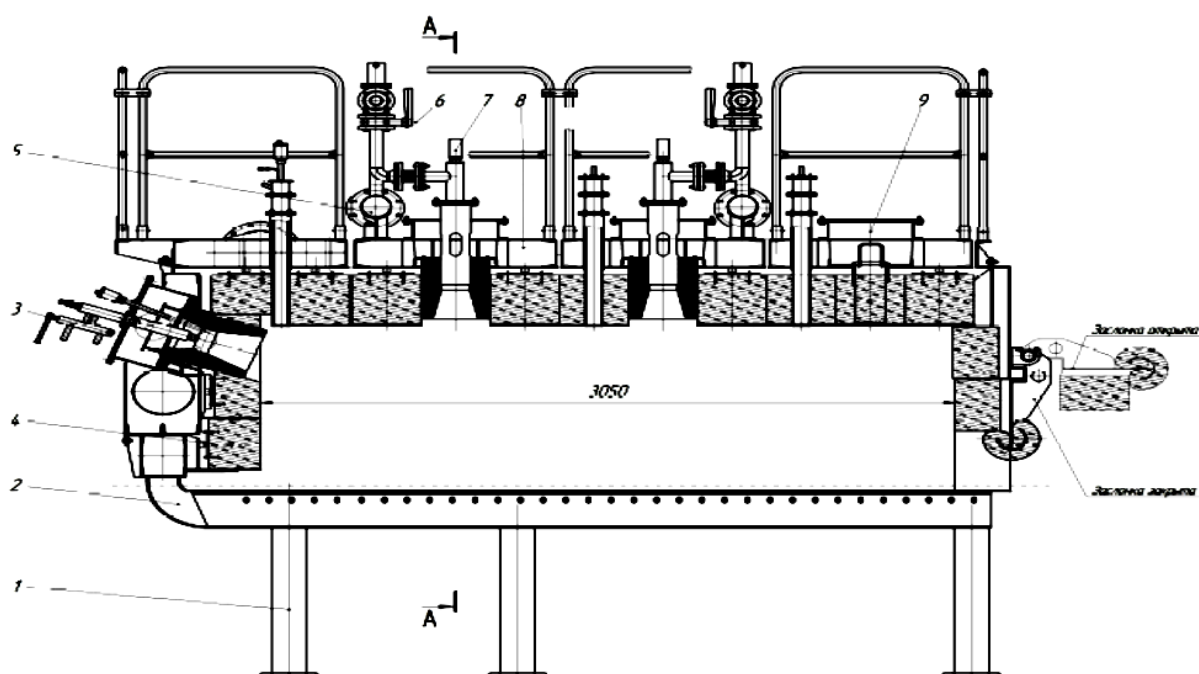
Общий вид горна показан на рисунках 4.2 и 4.3. Горн представляет собой камерную конструкцию с размерами рабочего пространства: ширина 3120 мм, длина 3050 мм и высота от свода до верха бортов тележек 940 мм.

Горн состоит из корпуса, сводовых, боковых, торцевых панелей. Все элементы горна съемные и заменяемые.

Корпус является основным несущим элементов горна, на котором расположены панели с тепловой изоляцией. Он представляет собой замкнутую раму, выполненную из швеллеров, образующих один подводящий поперечный коллектор и два продольных коллектора. Продольные коллекторы имеют стойки для размещения горна на каркасе машины. В этих коллекторах выполнены сопла для истечения воздуха, охлаждающего борта тележек.

Таблица 4.1 – Значения расхода воздуха и выхода продуктов сгорания ферросплавного газа и дизельного топлива

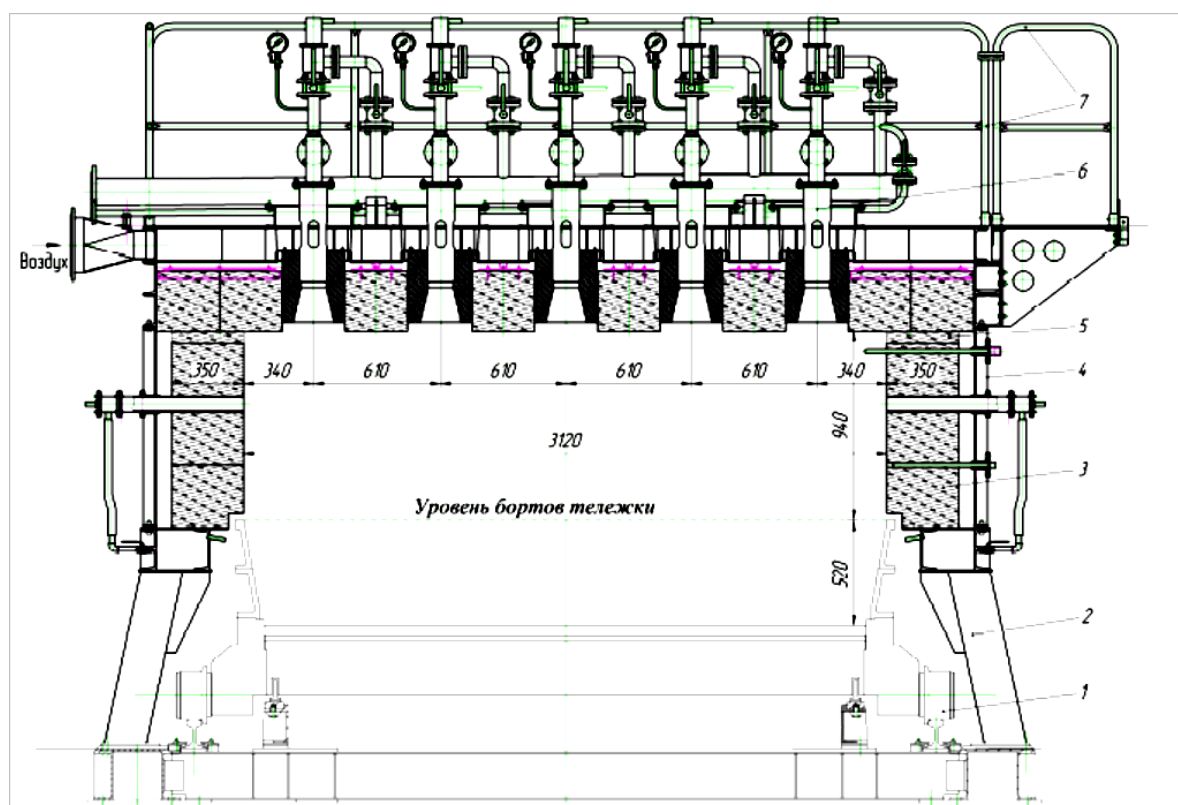
Параметры	Величина		
Температура горновых газов, °С	1350	1300	1250
Ферросплавный газ:			
коэффициент расхода воздуха	2,02	2,13	2,26
расход воздуха, м ³ /м ³	3,75	3,95	4,20
выход продуктов сгорания, м ³ /м ³	18,69	19,57	20,51
объемная доля кислорода, %	7,58	8,80	9,63
Дизельное топливо			
коэффициент расхода воздуха	1,61	1,69	1,78
расход воздуха, м ³ /м ³	17,81	18,69	19,63
выход продуктов сгорания, м ³ /м ³	4,39	4,60	4,84
объемная доля кислорода, %	9,05	10,02	11,18



1 – опорная стойка; 2 – коллектор охлаждающий; 3 – горелка жидкотопливная ГЖП-1,6; 4 – футеровка; 5 – газопровод; 6 – запорная регулирующая арматура; 7 – горелка сводовая ГПС-0.4/Ф; 8 – сводовая панель; 9 – транзитная сводовая панель

Рисунок 4.2 – Продольный разрез горна

Свод горна выполнен в виде четырех панелей. Панели являются одновременно и воздушными коллекторами для подвода воздуха. Передняя сводовая панель обеспечивает транзитный проход воздуха в торцевую панель.



1 – тележка; 2 – опорная стойка; 3 – футеровка; 4 – каркас; 5 – уплотнитель;
6 – сводовая панель с горелкой; 7 – перила.

Рисунок 4.3 – Поперечный разрез горна (сеч. А-А по рисунку 4.1)

Две средние сводовые панели предназначены для установки газовых горелок и имеют самостоятельные воздухоподводящие патрубки. На этих же панелях на специальных опорах установлены газовые коллекторы, от которых выполнены подводы газа к горелкам с газовой арматурой, и продувочные трубопроводы. Последняя сводовая панель является резервной.

В панелях заложены гильзы для контроля температуры нижней плоскости панели, обращенной в сторону рабочего объема горна.

Между сводовыми панелями и боковыми стенами выполнено уплотнение, исключающее подсос атмосферного воздуха и выбивание продуктов горения.

По всему периметру свода на панелях выполнены ограждения, так как свод является площадкой для обслуживания горелок и вспомогательного оборудования. Передняя торцевая панель предназначена для установки жидкотопливных горелок. Она выполнена в виде пустотелой балки с патрубками для установки горелочных камней и с двухсторонним подводом воздуха.

Задняя торцевая панель выполнена из двух частей. Верхняя часть неподвижная, нижняя часть выполнена в виде поворотной заслонки с подъемным механизмом, противовесом и стопором.

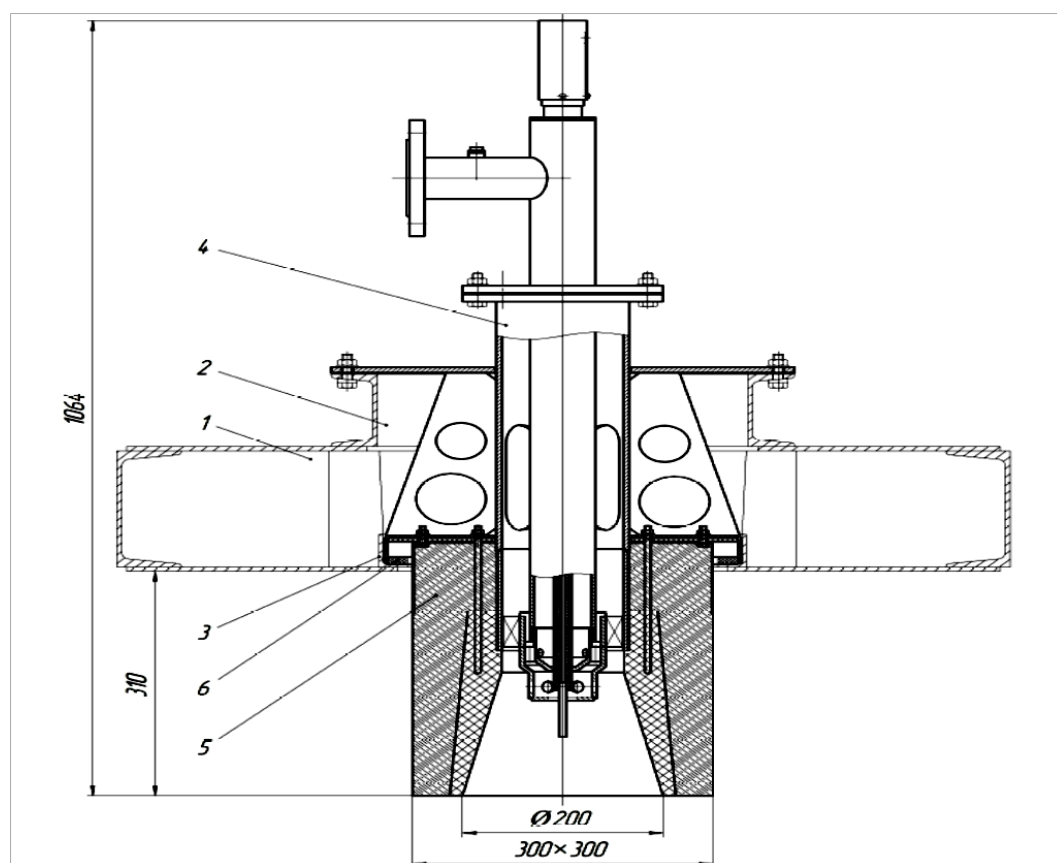
Вся внутренняя поверхность горна футерована легковесными волокнистыми материалами типа модуль Z-block, имеющими температуру применения 1425°C. Блоки крепятся к панелям и своду при помощи анкеров.

Система отопления горна обеспечивает раздельное или совместное сжигание газа и жидкого топлива.

Газовое топливо сжигается в сводовых горелках, жидкое – в торцевых.

Воздух подается во все воздухоохлаждаемые элементы горна независимо от того, на каком топливе работает горн.

На каждой горелочной сводовой панели установлены по пять газовых горелок (рисунок 4.4). Особенностью горелок является их выполнение как унитарных изделий, содержащих устройство смешения газа и воздуха, устройство розжига, ионизационного контроля пламени и горелочный камень, и установленных в общем воздухоподводящем корпусе (сводовой панели).



1 – воздухоподводящая панель; 2 – установочный патрубок; 3 – выходной патрубок; 4 – воздухонаправляющая труба с газовой частью; 5 – горелочный камень; 6 – прокладка.

Рисунок 4.4 – Горелка ГПС-0.4Ф при установке на воздухоподводящей панели горна

Собственно горелка состоит из воздухонаправляющего корпуса и газовой части со стабилизатором. Воздухонаправляющий корпус выполнен из трубы диаметров 133 мм.

Выходная часть корпуса выполнена из жаростойкой стали. В корпусе предусмотрены четыре отверстия для входа воздуха из воздушного корпуса панели.

Розжиг газовых горелок производится при помощи искрового разряда, который инициируется в выходном наконечнике каждой горелки при помощи местного блока розжига.

Управление всеми газовыми горелками горна обеспечивается при помощи общего шкафа управления.

Горелочный камень выполнен составным. Наружная часть его выполнена из волокнистого материала, внутренняя – из карбида кремния. Камень крепится к горелке на подвесках и может извлекаться вместе с ней из горна для замены.

На торцевой панели установлены три вихревые жидкотопливные горелки. Каждая горелка имеет реверсивный завихритель воздуха с приводом, пневматическую форсунку и горелочный камень.

Управление работой торцевых горелок обеспечивают арматурная станция, автономная система розжига с запальными устройствами, работающими на керосине и отдельный шкаф управления.

Арматурная станция предназначена для снабжения жидкотопливных горелок дизельным топливом и сжатым воздухом. Она смонтирована на раме, содержит линии для подачи жидкого топлива и воздуха с запорной, регулирующей арматурой и измерительной аппаратурой и совместно со шкафом местного управления обеспечивает:

- подачу и слив жидкого топлива в начальный период работы;
- подачу топлива на три горелки горна;
- подачу сжатого воздуха в форсунки;
- подачу сжатого воздуха в топливную линию форсунок при остановке горна;
- подачу сжатого воздуха в бачок для нагнетания керосина в запальники.

При проведении испытаний на агломашине выполнили измерения температур поверхности шихты в горне. Агломашина производила офлюсованный агломерат, температура шихты составляла 38 °С, высота слоя — 240 мм, плотность шихты — 1970 кг/м³, содержание возврата — 27,3 %, влага — 8,1 %, выход годного — 0,592 кг агломерата/кг влажной шихты, скорость движения спекательных тележек — 1,8 м/мин. В патрубках двух первых вакуум-камер агломашин установлены плиты для дросселирования со стационарными отверстиями разного сечения.

По результатам определений доля фракции > 3 мм в топливе (коксовой мелочи) с весодозаторов составляла 5,9 %, фракции < 0,5 мм - 39,2 %, среднелогарифмический диаметр топлива - 0,80 мм. Среднелогарифмический диаметр частиц шихты после окомкователя - 2,62 мм, содержание углерода - 4,18 %.

Характеристики шихты и спека по пробам, отобранным со спекательных тележек, приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Характеристика шихты и спека по пробам, отобранным со спекательных тележек

Расстояние от верха слоя, мм	Шихта		С, %	FeO, %	Спек прочность по ГОСТ 15137-77, %	
	Плотность, кг/м ³	Диаметр частиц, мм			≥ 5 мм	≤ 0,5 мм
0-80	1790	2,04	4,37	15,1	60,6	5,8
80-160	1940	2,25	4,48	15,1	58,5	6,0
160-240	2100	3,48	3,69	12,4	66,1	7,3

Горн работал с автоматическим управлением тепловым режимом. По термопаре, установленной в боковой стенке под второй панелью на расстоянии 20 мм выше кромки борта спекательных тележек, регулировался расход газа (заданная температура — 1170 °С).

Средний расход газа на отопление горна составил 430 м³/ч (14,4 МДж/ч), соотношение расходов воздух – газ на горелки — 14,4:1. Температуру поверхности шихты измеряли пирометром через боковые стенки горна со стороны козырька.

Результаты измерений в горне сводятся к следующему. При скорости фильтрации, рассчитанной как объем продуктов сгорания, отнесенный к площади отапливаемой части горна ($w_{зж} = 0,204 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$), воспламенение твердого топлива на поверхности шихты происходило на расстоянии 400 – 500 мм от начала арки при ее протяженности по горизонтали 700 мм.

Температура поверхности шихты в центре горна под второй панелью, под третьей, в начале козырька и на выходе из-под него составляла соответственно 1260, 1170, 1130 и 670 °С.

Для частиц шихты и топлива со среднелогарифмическим диаметром соответственно 2,04 и 0,80 мм расчетная продолжительность нагрева от 38 °С до температуры воспламенения (~ 700 °С), горения топлива на поверхности слоя, дополнительного нагрева и охлаждения поверхности спека до 670 °С составила 0,2 – 0,3, 1,4 – 1,5, 1,3 – 1,4 мин соответственно. Для выгорания твердого топлива по всей высоте слоя средняя скорость перемещения зоны горения должна быть не менее 19,6 мм/мин. При этом высота зоны горения на момент $t_{зж} = 1,7$ мин составит 27 – 29 мм.

Прочность и истираемость спека из верхней части слоя были выше, чем из середины (таблица). Процесс зажигания шихты характеризовался следующими показателями: $I = 26,7 \text{ МДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$, $Q' = 45,4 \text{ МДж}/\text{м}^2$, $q_{зж} = 160 \text{ МДж}/\text{т}$ агломерата. В связи с этим представляется возможным уменьшить расход тепла на зажигание за счет сокращения продолжительности дополнительного нагрева в отапливаемой части горна и реализации режима “нулевого давления” в рабочем пространстве горна на уровне бортов тележек с использованием АСУ.

В отечественной практике известны случаи [9], когда часть химического тепла от сжигания газа заменяют физическим теплом воздуха с охладителя агломерата. Подогретый воздух подают в горелки горна и в укрытие за ним. Для агломашины МАК-408, изготовленной ОАО “МК ОРМЕТО – ЮУМЗ” и монтируемой на Визакхапатнамском металлургическом заводе в Индии, проектный расход тепла на зажигание составляет 62,8 МДж/т агломерата. Кроме того, в горелки горна и в укрытие за ним протяженностью 37 м предусмотрена подача воздуха с температурой 275 °С с охладителя агломерата. Дополнительный приход тепла с воздухом в верхнюю часть слоя составит 167,4 МДж/т агломерата.

Таким образом, на зажигание и дополнительный подогрев шихты потребуется тепла 230,2 МДж/т агломерата, причем на 73 % — это утилизированное (возвращенное в процесс агломерации) тепло.

Приведена схема расчета продолжительности зажигания аглошихты с использованием удельного расхода воздуха на процесс спекания, величина которого определяется теплотребностью шихты, температурой ее плавления и условиями теплообмена между воздухом и спеком (верхняя ступень теплообмена), продуктами сгорания и шихтой (нижняя ступень теплообмена).

Расчет проводится на основании исходных данных, задаваемых при проектировании нового горна (агломашины), или с использованием сведений о работе конкретного агрегата. Изложенная методика применена при разработке зажигательных малогабаритных горнов конструкции ВНИИМТа для агломашин различной производительности.

Горнами данной конструкции, оснащенными АСУ различной комплектации, оборудованы десять агломашин с шириной спекательных тележек 3 м.

Во всех случаях без ухудшения качества агломерата верхнего слоя получено сокращение удельного расхода тепла в 2 – 2,5 раза, что позволяет заменять распространенные ранее удлиненные горны для комбинированного нагрева шихты. Дальнейшие направления сокращения удельного расхода тепла на зажигание - повышение уровня автоматического управления тепловым и газодинамическим режимами и использование в процессе зажигания и для подогрева верхнего слоя горячего

5 Оценка технико-экономической эффективности предлагаемых технических решений

5.1 Комплексное использование сырья, отходов производства, вторичных энергоресурсов

Агломерационная фабрика Аксуского завода ферросплавов представляет собой сложный производственный комплекс, предназначенный для окускования мелких фракций шихтовых материалов и фактически является структурным подразделением основного производства предприятия, утилизирующим отсеvy руд, кварцита, пыли газоочистки с целью возврата в плавильные цеха побочных продуктов и отходов ферросплавного производства завода. При этом обеспечивается рост производительности существующих плавильных печей за счет стабилизации процесса выплавки ферросплавов, так как восстановительная способность агломерата выше по сравнению с рудой.

Кроме того, использование в качестве шихты окускованного агломерата снижает выделения пыли при плавлении ферросплавов и улучшает экологическую ситуацию промышленного района.

Аглофабрика размещается в непосредственной близости от ферросплавного производства завода, в связи с необходимостью использования при производстве агломерата большого объема побочных продуктов и отходов этого производства. Близость основного ферросплавного производства позволяет транспортировать агломерат ленточными конвейерами в плавильные цеха предприятия.

В агломерационном процессе утилизируются пыли газоочисток ферросплавных цехов, а также мелочь кокса, получаемая при его сортировке в цехах шихтоподготовки предприятия. В качестве топлива для зажигания агломерационной шихты используется ферросплавный газ, образующийся на предприятии, как вторичный энергоресурс при выплавке ферросплавов.

Применяемые в настоящее время на заводе для выплавки феррохрома и силикомарганца хромовые и марганцевые руды содержат около 15 % мелочи фракцией менее 10 мм. В процессе подачи руды до печи происходит её измельчение на перегрузках, ведущее к дополнительному образованию еще 5-10 % мелочи. Попадание мелочи в печь ведет к существенному ухудшению технико-экономических показателей плавки. Ориентировочное количество отсеvов хромовой и марганцевой руды совместно с пылевидными отходами составит около 120-140 тыс. тонн в год.

Ожидается увеличение мелочи, из-за использования марганцевой руды месторождения «Восточный Камыс», добыча которой связана образованием повышенного количества мелких фракций, требующих окускования.

Использование агломерата при производстве ферросплавов позволит:

- утилизировать образующиеся на заводе пыли аспирационных систем и всевозможные отсеvy (кварцита, кокса, марганцевой и хромовой руды);

- повысить производительность печей за счет стабилизации процесса, снижения аварийности от выбросов и улучшения восстановительной способности агломерата по сравнению с рудой;
- снизить энергоемкость за счет перевода части восстановительных процессов идущих с поглощением большого количества тепла из электропечи на агломашину, где для этих целей используются более дешевые виды энергоносителей;
- уменьшить расход восстановителя за счет применения отсевов кокса и использования частично восстановленного агломерата.

Таблица 5.1 – Потребность аглофабрики в энергоресурсах

Наименование энергоносителя	Единица измерения	Годовой расход
Электроэнергия, в том числе:	тыс.кВт	26631,9
- на технологию	тыс.кВт	22524,1
- на электроосвещение	тыс.кВт	1175,4
Ферросплавный газ	тыс.м ³	9744
Дизельное топливо (резервное)	т	355
Пар	тыс.м ³	26,663
Горячая сетевая вода	тыс.м ³	66,998
Сжатый воздух	тыс.м ³	467,805
Вода техническая (осветленная вода)	тыс.м ³	17,66
Вода хоз-питьевая	тыс.м ³	8,756

Технологическая схема получения агломерата предусматривает использование отходов образующиеся при производстве агломерата, возвращаются на агломашину по замкнутому циклу. Пыль газоочистки и воздухоочистки аглофабрики, а также пыль аспирационных установок, просыпи и агломерат фракции 0-8мм возвращаются в производственный процесс производства агломерата системой улавливания, дозирования непрерывного транспорта.

Грязные промывные стоки, содержащие шлам пыли, образующиеся при очистке транспортных галерей и пересыпок (при переходе с одного вида агломерата на другой), направляются в существующий шламонакопитель. Откуда после обезвоживания возвращаются на аглофабрику на спекание с основной шихтой в количестве 200т/год.

В технологии предусматривается технические решения по использованию вторичных энергоресурсов.

Основным топливом для газопотребляющего оборудования агломерационного цеха является ферросплавный газ ферросплавного производства.

Потребление ферросплавного газа позволит сэкономить 271611 м³/год природного газа.

Предлагаемые технические решения по энергосбережению соответствуют действующим нормам, правилам и стандартам Республики Казахстан.

Аглофабрика потребляет следующие виды энергий:

- электрическую: на силовое оборудование; на освещение;
- воду: на технологию; на хоз-питьевые нужды; на гидросмыв;
- ферросплавный газ на технологию;
- дизельное топливо в качестве резерва ферросплавного газа;
- сжатый воздух на технологию и ремонтные цели;
- пар на технологию;
- теплофикационную воду на технологию и отопление.

Внедрение системы АСУ ТП аглофабрики с подключением к существующей автоматизированной системе управления завода позволит экономить до 8% каждого вида потребляемой энергии, а также ее эффективное использование.

АСУ ТП обеспечивает:

- повышение производительности аглофабрики на 3-5%;
- улучшение качества агломерата и снижение его себестоимости;
- достижение высокой эффективности, надежности и безопасности работы технологического оборудования;
- повышение производительности и улучшение условий труда обслуживающего персонала.

Достижение этих целей обеспечивается:

- контролем за протеканием технологических процессов, работой оборудования и действиями эксплуатационного персонала;
- стабилизацией и оптимизацией параметров технологического процесса;
- осуществлением аварийных защит оборудования;
- технологической сигнализацией об отклонении параметров от заданных значений;
- протоколированием и архивацией основных параметров процесса, позволяющих оперативно анализировать соблюдение технологии и работу оборудования.

К основным мероприятиям по сбережению электрической энергии, кроме учета, следует отнести:

- компенсация реактивной мощности;
- применение радиально магистральных схем, позволяющих отключать отдельные неработающие электроприемники;
- применение для освещения экономичных и долговечных люминесцентных ламп;
- использование фото реле для управления наружным освещением;
- применение устройств плавного пуска электродвигателей основного технологического оборудования;

– контроль и управление АСУ ТП всеми технологическими электроприемниками аглофабрики.

Технический учет электроэнергии и других видов энергии по энергоемким агрегатам агломерационного цеха осуществляет АСУТП.

Внедрение АСУ ТП позволяет экономить до 8% энергии, идущей на нужды производства за счет ее эффективного использования.

5.2 Подбор альтернативных восстановителей для агломерации

Плавка высокой интенсивности возможна при большом количестве сгорающего в печи кокса, что, с одной стороны, ведет к выделению большого количества тепла, а с другой – к образованию в нижней части печи свободного пространства (благодаря газификации твердого кокса), куда опускается шихта. Хорошая газопроницаемость шихты нужна для того, чтобы объем образующихся при горении кокса газов успевал проходить через межкусковые каналы слоя при относительно небольших перепадах давления газа. Из изложенного с очевидностью вытекает необходимость предварительного окускования мелких рудных материалов.

Происходящий в агломерационной машине МАК - 60/120 процесс предназначен для окускования мелких концентратов руд и отсевов кварцита, которые не пригодны к использованию в плавильных агрегатах из-за малого размера частиц. В качестве шихтовых материалов при агломерации предполагается также использовать пыль газоочисток ферросплавного и собственного производства.

Для зажигания агломерационной шихты используется ферросплавный газ, образующийся на предприятии, как вторичный энергоресурс при выплавке ферросплавов.

В качестве топлива при производстве хромового агломерата установлены смеси отсевов металлургического кокса. Анализ качественных показателей данных материалов указывает на нестабильность их технического состава. Так, к примеру (по данным ОТК) зола изменяется в пределах от 13,3 до 22,3%, а летучие от 2,1 до 3,7%, что отрицательно влияет на работу агломашины.

Анализ имеющихся в наличии углеродистых материалов и их качественные показатели указывают на то, что в качестве альтернативного аглотоплива можно рассматривать отсеvy спецкокса «Сары-Арка-Спецкокс». Данный материал производится из длинопламенных углей шубаркольского месторождения. Длительный период использования спецкокса при производстве ферросплавов показал себя с положительной стороны. Доля их в навеске, в зависимости от выплавляемого сплава изменяется в пределах от 20 до 60 кг/т.

Объемы образования отсевов спецкокса на заводе составляет 13 270 т/год. Потребность же аглопроизводства в топливе составляет около 15 000 т/год. Исходя из этого, эксперимент по агломерации хромовой руды с использованием в качестве топлива отсевов спецкокса «Сары-Арка» и

вовлечение в промышленный оборот данных отсевов является рациональным и комплексным решением вопроса для производства.

По данным технического анализа отсевов спецкокса следует, что содержание золы меняется в пределах 8,8 - 17,4%, а летучих 2,8 - 12,1%. Кроме этого, спецкокс характеризуется высокой влажностью, которая достигает 20 %.

В лаборатории металлургии и энергетики ТОО «ИИЦ ENRC» были проведены экспериментальные работы по агломерации хромовой руды с использованием в качестве топлива отсевов спецкокса «Сары-Арка».

Целью являлось принципиальная оценка пригодности отсевов спецкокса «Сары-Арка» для использования их в качестве аглотоплива.

Спекание хромовой руды проводили по принятой в лаборатории методике. В качестве исходных материалов использовались следующие материалы:

- | | |
|--------------------|---------------|
| – хромовая руда | фр. 0-10 мм; |
| – оборотный песок | фр. 0-4 мм; |
| – пыль ХШП | фр. 0-1,5 мм; |
| – возврат | фр. 0-8 мм; |
| – отсеvy спецкокса | фр. 0-5мм; |
| – отсеvy кокса | фр. 0-5 мм. |

Химические составы и ситовый анализ компонентов аглошихты представлены в таблицах 5.1 и 5.2.

Таблица 5.2 – Химический состав компонентов аглошихты

Показатели	Химический состав, %				
	Хр. руда	Оборотный песок	Пыль ХШП	Отсевы кокса	Отсевы спецкокса
Cr ₂ O ₃	48,2	22,1	40,1	-	-
W	3,3	0,3	0,5	-	-
Технический анализ, %					
A ^d	-	-	-	14,1	7,9
V ^d	-	-	-	2,2	6,6
W	-	-	-	8,6	16,3

Таблица 5.3 – Ситовый анализ компонентов аглошихты

Наименование материала	Фракционный состав, %				
	0-3 мм	3-5 мм	5-8 мм	8-10 мм	+10 мм
Хромовая руда	76,3	3,5	3,5	11,1	5,6
Возврат (с аглоцеха)	49,8	11,7	4,9	27,4	6,2
Оборотный песок	98,8	0,8	0,4	-	-
Отсевы спецкокса	97,6	2,1	0,3	-	-
Отсевы кокса	95,0	4,2	0,8	-	-

В целом химические составы компонентов аглошихты удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям. Исключение составляет высокое

содержание летучих в спецкоксе «Сары-Арка», которое согласно технологической инструкции производства хромового агломерата не должно превышать 5,5%.

Из литературных данных известно, что основная часть летучих с потоком отходящего газа покидает агломерационный слой, в результате чего смолистые вещества оседают на рукавных фильтрах, снижая их пропускную способность. Это отрицательно сказывается на работе газоочистного оборудования.

По гранулометрическому составу компоненты аглошихты в целом удовлетворяют требованиям процесса агломерации. Исключением является возврат, доставленный с аглоцеха, где класс крупности более 8 мм составлял 33,6 %. Наличие крупных частиц в возврате объясняется просыпью «постели» и шихты при загрузке их на паллеты в головной части и по всей длине агломашины.

Дополнительно произведен сравнительный ситовый анализ отсеков спецкокса и кокса на наличие мелких классов крупности до –0,5 мм. Результаты рассевов показали, что в отсевах кокса и спецкокса содержание данного класса крупности составляет соответственно около 40% и 50%. Известно, что наличие мелких классов в топливе приводит к снижению прочности агломерата и производительности агломашины из-за уменьшения газопроницаемости слоя шихты.

Состав аглошихты был принят аналогичный составу, используемому в условиях аглоцеха:

- хромовая руда – 25 кг;
- отсева спецкокса – 5,5%;
- оборотный песок – 7,5 %;
- пыль ХШП – 6,0%;
- возврат – 25,0 %.

Используемый в аглошихте возврат имел крупность 0-8 мм. Для постели применялся агломерат фракции 8-10 мм. Влажность аглошихты составляла 7,5-8,0 %.

За окончание процесса спекания и начала охлаждения аглоспека принимали момент, когда температура отходящих газов понижалась на 20 °С от максимального значения. Охлаждение вели до температуры агломерационных газов 100 °С, затем процесс останавливали.

На начальной стадии исследований было проведено спекание «на возврат», для чего спекали хромовую руду с содержанием топлива 8 % в слое высотой 350 мм. Из полученного спека был получен возврат, который использовали в последующих опытах.

В общей сложности проведено 9 спеканий. При спеканиях высота слоя аглошихты во всех случаях составляла 450 мм, разрежение при спекании и охлаждении составляло 9-10 кПа.

На начальном этапе спеканий доля спецкокса в аглошихте составляла 5,5%. При этом выход возврата составил 183 %. Для достижения баланса в следующем опыте была произведена корректировка доли спецкокса в агло-

шихте, ее доля была увеличена до 6,5%, что привело к снижению выхода возврата (156%), однако полученное количество также далеко от оптимального.

В следующем опыте была увеличена доля возврата до 30,0%. В данном опыте баланс возврата составил 109%, что указывает на баланс спекания.

Для сравнительного анализа результатов агломерации хромовой руды с использованием отсеков спецкокса, были проведены аналогичные спекания с использованием отсеков кокса. Результаты данных экспериментов показали, что при доле отсеков кокса в аглошихте на уровне 5,5% можно получить качественный агломерат с балансом спекания 103%. Из этого следует, что при использовании спецкокса в аглошихте, его доля должна быть выше, чем при использовании отсеков кокса. Основные показатели процесса агломерации с использованием обоих видов топлива представлены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Показатели процесса агломерации при использовании различных видов топлива

Агло- топливо	Показатели								Прочность по ГОСТ-15137-87	
	Высота слоя шихты, мм	Скорость спекания, мм/мин	Скорость охлаждения, мм/мин	Удельная производитель- ность, т/м ² ·час	Баланс возврата, %	Выход годного агломерата, %	Высота усадки, мм	Макс. температура отходящих газов, °С	На удар, %	На истирание, %
Отсевы спецкокса	450	11,2	18,4	0,633	109	59	60	287	51,2	14,9
Отсевы кокса	450	10,7	19,3	0,675	103	68	50	308	67,2	13,4

Из сопоставления полученных значений следует, что основные показатели процесса агломерации - выход годного агломерата и удельная производительность аглоустановки при использовании отсеков спецкокса ниже, чем показатели спекания, при использовании отсеков кокса. Также отмечена относительно низкая механическая (барабанная) прочность агломератов полученных с использованием спецкокса.

В результате проведенных исследований показана принципиальная возможность получения хромового агломерата с использованием в качестве топлива отсеков спецкокса «Сары-Арка». Однако полученные при этом показатели спекания хромовой руды уступают показателям агломерации с использованием отсеков кокса.

Анализы технического состава топлива указывают на нестабильность, но сопоставимость качественных показателей. К примеру, содержание золы в отсевах спецкокса изменяется от 8,8 до 17,4%, а летучих веществ от 2,8 до 12,1%. Максимальное содержание летучих в отсевах кокса не превышает 3,7%.

Установлено высокое содержание в спецкоксе мелких классов крупности. К примеру, доля классов крупности менее 0,5 мм в спецкоксе составила около 50%, а в отсевах кокса 40%. Известно, что высокое содержание мелких классов в составе аглотоплива приводит к снижению прочности агломерата и производительности агломашины.

Обобщение результатов проведенных работ с учетом существующего уровня стабильности качественных показателей исследованных видов топлива, указывают на то, что альтернативным видом топлива при производстве хромового агломерата может служить отсеvy спецкокса в смеси с отсевами кокса.

5.3 Техничко-экономическая эффективность внедрения предложенных технических решений

Ориентировочную оценку значений годовой экономии электроэнергии $\Delta \mathcal{E}$ от установки источника реактивной мощности (ИРМ) мощностью QКУ можно получить, используя так называемый экономический эквивалент, который ориентировочно равен 0,03кВт на 1квар. Установка ИРМ снижает токи в трансформаторах и кабельных линиях, а отсюда и потери мощности. Предусматривается установить низковольтные конденсаторные установки со ступенчатым регулированием общей мощностью 1800кВАр. Суммарное снижение потерь мощности составит 54кВт.

Экономия электроэнергии за год при непрерывном графике работы составит:

$$\Delta \mathcal{E} = 54 \cdot 8200 = 442000 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (5.1)$$

Применение регулируемых ИРМ не только снижает неоправданные потери электроэнергии за счет устранения реактивных нагрузок в сети, но и способствует экономичному режиму работы электроприемников за счет:

- уменьшения потерь электроэнергии в неучтенных элементах сети, например, в трансформаторе КТП;
- устранения возможных надбавок к тарифу на электроэнергию за потребление реактивной мощности, превышающее договорные значения;
- улучшения качества электроэнергии (увеличение срока службы ламп, сокращение потерь мощности в асинхронных двигателях и др.);
- повышения за время окупаемости тарифа на электроэнергию.

Основными мероприятиями по энергосбережению, являются:

- учет расхода всех энергоносителей;
- утилизация физического тепла аглогазов за счет рециркуляции части отходящих аглогазов и подачи их в укрытие агломашины;
- утилизация химического тепла рециркулируемых аглогазов за счет дожигания СО;

– оснащение эксгаустеров тиристорными преобразователями частоты вращения электродвигателя.

Расчет годового экономического эффекта за счет внедрения указанных мероприятий приводится ниже.

Расчет годовой экономии топлива за счет утилизации физического тепла рециркулируемых аглогазов.

Экономия тепловой энергии рассчитывается по формуле:

$$Q_{год} = V \cdot \rho \cdot C_p \cdot \Delta T \cdot \tau, \text{ ГДж} \quad (5.2)$$

где V - объем рециркулируемых аглогазов, $\text{м}^3/\text{ч}$;

ρ - плотность аглогазов, $\text{кг}/\text{м}^3$;

C_p - теплоемкость газов;

ΔT - разность температур аглогаза и окружающего воздуха;

τ - годовой фонд времени работы агломашины, ч.

При производстве марганцевого агломерата экономия тепловой энергии составит:

$$Q_{год}^{Mn} = 51480 \cdot 0,815 \cdot 1,0188 \cdot 140 \cdot 1525 \cdot 10^{-6} = 9126,05 \text{ ГДж}.$$

При производстве хромового агломерата:

$$Q_{год}^{Cr} = 51480 \cdot 0,898 \cdot 1,0131 \cdot 100 \cdot 6400 \cdot 10^{-6} = 29974,17 \text{ ГДж},$$

что соответствует экономии топлива в размере 1334,5 т.у.т.

Расчет годовой экономии топлива за счет дожигания СО при рециркуляции аглогазов.

Содержание СО в аглогазах принято согласно химических реакций и расчетов горения топлива.

Объем рециркулируемых аглогазов составляет 30% от объема, удаляемого в окружающую среду. Количество экономии тепловой энергии от дожигания СО составит:

$$Q_{год} = V_{а.г.} \cdot 0,3 \cdot Q_{н.СО}^p, \text{ ГДж}; \quad (5.3)$$

где $V_{а.г.}$ - годовой объем удаляемого от агломашины СО, $\text{м}^3/\text{год}$;

$Q_{н.СО}^p$ - теплота сгорания СО.

При производстве марганцевого агломерата экономия тепловой энергии определена в размере:

$$Q_{год}^{Mn} = 2812800 \cdot 0,3 \cdot 12,68 \cdot 10^{-6} = 10699,89 \text{ ГДж}$$

При производстве хромового агломерата:

$$Q_{\text{сод}}^{\text{Cr}} = 867456 \cdot 0,3 \cdot 12,68 \cdot 10^{-6} = 32998,02 \text{ ГДж}$$

Общее количество экономии тепловой энергии за счет дожигания СО определено в размере:

$$10699,89 + 32998,02 = 43697,91 \text{ ГДж},$$

что соответствует экономии 1491 т.у.т.

Общее количество экономии топлива за счет утилизации физического и химического тепла рециркулируемых аглогазов оценивается в объеме 2825,5 т.у.т.

Расчет экономии электроэнергии за счет оснащения эксгаустеров тирристорными преобразователями частоты.

Поскольку агломашина работает в разных режимах при производстве марганцевого и хромового агломератов, необходимо изменять соответственно производительность эксгаустеров.

Расчет экономии электроэнергии определен путем сравнения КПД эксгаустеров при регулировании производительности и разрежения с помощью тирристорных преобразователей частоты или с помощью дроссельных устройств.

В соответствии с характеристиками эксгаустеров, при переходе работы агломашины с марганцевого агломерата на хромовый агломерат установка дроссельных устройств снижает КПД агрегата на 7%, а с использованием тирристорных преобразователей КПД агрегатов постоянный и находится в пределах 81-83%.

Годовая экономия электроэнергии за счет установки тирристорных преобразователей составит:

$$W = (N_{\text{эк.г}} + N_{\text{эк.з}}) \cdot 0,07 \cdot \tau, \text{ кВт} \cdot \text{ч}, \quad (5.4)$$

где $N_{\text{эк.з}}$ – потребляемая мощность эксгаустера газоочистки, кВт;

$N_{\text{эк.г}}$ – потребляемая мощность эксгаустера воздухоочистки;

τ – годовой фонд времени работы эксгаустера при спекании хромового агломерата.

$$W = (2286 + 1540) \cdot 0,07 \cdot 6400 \cdot 10^3 = 1714 \text{ тыс.кВт} \cdot \text{ч}.$$

Кроме того, оснащение эксгаустеров преобразователями частоты вращения позволит обеспечить плавный пуск агрегатов и запас по производительности и разрежению за счет возможности увеличения частоты тока и соответственно числа оборотов двигателя.

Структура теплового баланса процесса агломерации приведена в таблице 5.5 Конкретно по каждому виду производимого агломерата тепловые балансы приведены в таблицах 5.6, 5.7.

Таблица 5.5 – Структура теплового баланса процесса агломерации

Приход тепла	%	Расход тепла	%
Горение углерода	77,07	Теплота годного агломерата	16,78
		Теплота возврата	3,80
		Теплота отходящих газов	46,66
Горение углерода СО	7,74	Теплота пыли	0,01
		Диссоциация карбонатов	10,07
Теплота зажигания	6,50	Разложение гидратов	0,53
		Испарение воды	18,18
Теплота образования силикатов	6,74	Потери тепла при нагреве колосников паллет	1,45
Сгорание серы	1,43	Потери тепла в зажигательном горне	0,11
		Потери тепла от выбивания пламени из-под кромок зажигательного горна	0,08
Теплота окисления	0,52	Потери тепла при нагреве бортов паллет	0,40
		Прочие тепловые потери	1,93
Итого	100,00	Итого	100,00

Таблица 5.6 – Уточненный тепловой баланс (без рециркуляции аглогаза) спекания марганцевого агломерата (на 1 т годного агломерата)

Приход тепла	%	Расход тепла	%
Горение углерода	77,07	Теплота годного агломерата	16,78
		Теплота возврата	3,80
		Теплота отходящих газов	46,66
Горение углерода СО	7,74	Теплота пыли	0,01
		Диссоциация карбонатов	10,07
Теплота зажигания	6,50	Разложение гидратов	0,53
		Испарение воды	18,18
Теплота образования силикатов	6,74	Потери тепла при нагреве колосников паллет	1,45
Сгорание серы	1,43	Потери тепла в зажигательном горне	0,11
		Потери тепла от выбивания пламени из-под кромок зажигательного горна	0,08
Теплота окисления	0,52	Потери тепла при нагреве бортов паллет	0,40
		Прочие тепловые потери	1,93
Итого	100,00	Итого	100,00

Таблица 5.7 – Уточненный тепловой баланс спекания (без рециркуляции аглогазов) хромового агломерата (на 1 т годного агломерата)

Приход тепла	%	Расход тепла	%
Горение углерода	77,07	Теплота годного агломерата	16,78
		Теплота возврата	3,80
		Теплота отходящих газов	46,66
Горение углерода СО	7,74	Теплота пыли	0,01
		Диссоциация карбонатов	10,07
Теплота зажигания	6,50	Разложение гидратов	0,53
		Испарение воды	18,18
Теплота образования силикатов	6,74	Потери тепла при нагреве колосников паллет	1,45
Сгорание серы	1,43	Потери тепла в зажигательном горне	0,11
		Потери тепла от выбивания пламени из-под кромок зажигательного горна	0,08
Теплота окисления	0,52	Потери тепла при нагреве бортов паллет	0,40
		Прочие тепловые потери	1,93
Итого	100,00	Итого	100,00

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассматриваемая диссертация является самостоятельной научно-квалификационной работой, в которой решается актуальная задача - совершенствование технологических операций и технических средств агломерационного производства с целью снижения его негативного воздействия на окружающую среду. Решение этой задачи имеет существенное значение для развития черной металлургии и основано на научно обоснованных технологических и технических разработках, обеспечивающих экономию энергоресурсов и улучшение экологической обстановки в городах и регионах с развитой горнодобывающей и металлургической промышленностью.

Основные результаты исследований состоят в следующем:

1. На основании анализа теплообменных процессов, протекающих в слое спекаемой шихты при производстве агломерата, определены условия, необходимые для эффективного применения операции рециркуляции аглогазов, обеспечивающей снижение выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду, уточнен механизм образования этих веществ в процессе агломерации и их эмиссии в окружающую среду.

2. Выполнено расчетно-аналитическое обоснование возможности применения процесса рециркуляции аглогазов, отводимых от зон спекания агломашиной, используемых в настоящее время. На основании результатов обширных исследований, проведенных на действующих агломашинах, установлено, что в условиях действующих аглофабрик при использовании агломашиной типа АКМ-60/120,наименее затратным является способ, основанный на отведении части аглогазов,прошедших очистку, после эксгаустера под укрытие зоны спекания агломашины в качестве рециркулята. По этому способу при содержании горючего углерода до 4% содержание кислорода в зоне подачи можно обеспечить на уровне 17%,степень рециркуляции 23-25% и добиться сокращения выбросов вредных веществ в 1,8-2 раза. Для предотвращения выброса вредных веществ в рабочую зону разработана конструкция укрытия зоны спекания.

3. Теоретически обоснована и подтверждена расчетами возможность снижения вредных выбросов при производстве агломерата за счет интенсификации процесса спекания аглошихты, обусловленной акустической обработкой аглошихты в зоне спекания. Разработана конструкция стержневого газоструйного генератора, обеспечивающего интенсификацию процесса спекания аглошихты и система акустической обработки зоны спекания; проведены ее промышленные испытания и определены оптимальные параметры работы этой системы, обеспечивающие снижение выбросов: СО на 16%, NO₂ на 17%.

4. Результаты промышленных исследований, проведенных на агломашине аглофабрик АЗФ подтвердили достоверность аналитически полученных зависимостей и обоснованность применения разработанной технологической

операции рециркуляции аглогазов при агломерации марганцевых и хромистых материалов.

5. На основании данных промышленных исследований установлено, что в режиме образования и поддержания зоны горения твердого топлива имеет место низкая концентрация кислорода в продуктах сгорания, обусловленная необходимостью обеспечения высокой температуры в горне. Дефицит кислорода ограничивает скорость горения твердого топлива в слое под горном, что выражается в снижении количества выгоревшего углерода в шихте.

6. Получено выражение для расчета скорости фильтрации продуктов сгорания через слой под горном и величины дросселирования вакуум-камер при нагреве шихты и в режиме ее зажигания.

7. Предложен алгоритм расчета скоростей фильтрации и величины дросселирования вакуум-камер под горном, учитывающий физические характеристики агломашины, удельную производительность, химический состав шихты и вид газообразного топлива.

8. Разработана методика расчета времени зажигания агломерационной шихты (для горна) в зависимости от конкретных начальных условий.

9. Разработана базовая конструкция горна для зажигания шихты, обеспечивающего энергосберегающую технологию агломерации за счет плавного изменения температуры шихты по длине горна, равномерного нагрева по ширине горна, возможности использования нагретого воздуха от охлаждения спека и рециркуляции дымовых газов. Результаты испытаний позволили без ухудшения качества агломерата верхнего слоя получено сокращение удельного расхода тепла в 2...2,5 раза, что позволяет заменять распространенные ранее удлиненные горны для комбинированного нагрева шихты.

10. Разработана математическая модель агломерационного процесса, которая может служить алгоритмом управления тепловым и газодинамическим режимами работы горна, базовым параметром которого является удельный расход теплоты на зажигание с помощью АСУ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Герасимов Л. К., Фролов Ю. А., Расин Б. С. и др. Основные теплотехнические направления совершенствования работы агломашин // Сталь. 1990. № 3. С. 21 – 23.
2. Герасимов Л. К., Баранов М. С. Решение экологических и энергосберегающих задач при производстве агломерата // Сталь. 1995. № 4. С. 78 – 80.
3. Герасимов Л. К., Викулов Г. С., Кабанов Ю. А., Добряков Г. Г. Результаты освоения установки по утилизации тепла охлаждения агломерата на агломашине АКМ-312 // Сталь. 1998. № 3. С. 8 – 9.
4. А. с. 1235955 СССР. Устройство для утилизации тепла агломерата / Л. К. Герасимов, В. А. Мирко, А. И. Раков и др. // Открытия. Изобретения. 1986. № 21. С. 98.
5. Сигов А. А., Шурхал В. А. Агломерационный процесс. — Киев :Техника, 1969. — 232 с.
6. Фролов Ю. А. Теплотехнические аспекты начального периода агломерации // Сталь. 2004. № 1. С. 2 – 10.
7. Пат. 2275435 РФ, МПК С 22 В 1/20, F 27 В 21/08. Способ зажигания агломерационной шихты, перемещающейся на спекательных тележках / Герасимов Л. К., Дружинин Г. М., Чистополов В. А. и др. — № 2004124674/02 ; опубл. 27.04.2006, Бюл.№12. — 5 с.
8. Герасимов Л. К., Викулов Г. С., Кабанов Ю. А., Добряков Г. Г. Результаты освоения установки по утилизации тепла охлаждения агломерата на агломашине АКМ-312 // Сталь. 1998. № 3. С. 8 – 9. УДК 621.783.2:669.054
9. Патент РФ №33333 на полезную модель. Устройство для генерирования акустических колебаний / Гусев А.М., Афонина Е.А., Черчинцев В.Д., Дробный О.Ф.// Опубл. В Б.И. №29,20.10.2003.
10. Гусев А.М., Афонина Е.А., Черчинцев В.Д., Дробный О.Ф. Разработка системы регенерации элементов газовых трактов в акустическом пограничном слое. / Вестник МГТУ // Metallurgical processes. Ecology and safety of life activity. №1, 2004, - С.52-54 (издание из списка ВАК).
11. Черчинцев В.Д., Дробный О.Ф. Применение рециркуляции аглогазов с целью снижения вредных выбросов в окружающую среду и рациональное использование энергоресурсов в процессе агломерации железных руд И Проблемы повышения экологической и промышленной безопасности производственно-технических комплексов промышленных регионов: Сб. науч. трудов. - Магнитогорск, 2004, - С. 148-153.
12. Черчинцев В.Д., Гусев А.М., Дробный О.Ф. Методика определения режима рециркуляции аглогазов при агломерации железосодержащих материалов // Теория и технология металлургического производства: Сб. науч. трудов. Вып.6. - Магнитогорск, 2006, - С.194-198.

14. В.И.Коротич, Ю.А.Фролов, Г.Н.Бездежский. Агломерация рудных материалов. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ. 2003г. 400с.
15. Инжекционные и короткофакельные горелки для сжигания природного газа. /Арсеев А.В., Маслов В.И., Винтовкин А.А. и др.-Научно-технический обзор. Сер. «Использование газа в народном хозяйстве. ВНИИГазпром. 1973г. 34с.
17. Совершенствование тепловой работы зажигательных горнов агломашин на ЗСМК. / Сельский Б.И., Титов Н.В., Смольников А.Ф.и др.- Сталь, 1987, с.8-10.
18. Сайно М., Такахаси Х., Танака К. Разработка нового зажигательного устройства для агломашин // Тэцу то хагане. 1985.Т.71.№18. С. 1985-1991.
19. Фролов Ю.А., Баранов М.С., Герасимов Л.К. Теплотехнические способы повышения эффективности производства агломерата.//Металлургическая теплотехника: сб. науч. трудов / ВНИИМТ. – М.:Металлургия. 1979. №8. С.18-35.
20. Knaak R/Neuts zundverfahren senkt den Energieverbrauch bein Erxsihter/Gas Warneinternational. 1981/ B.30.H.10.S.487-495.
21. Исследование возможностей регулирования состава газовой среды на обжиговых машинах /Клейн В.И., Абзалов В.М., МайзельГ.М. и др./Металлургическая теплотехника: Темат. сб. науч. тр.ВНИИМТ.- М.:Металлургия. 1978.№6. С. 16-24.
22. Магидей А.А., Филонов А.В. К влиянию рециркуляции частично-охлажденных газов в зону горения на эмиссионные свойства мазутного факела// Тепло- массоперенос: Темат. Сб./ Минск: ИТМО.1973. С.606-613.
24. Otacar Kume, Milos Benes, Tiri Macak. Vliv zneistení vzduchu inerty na stabilitu a jakost spalovanív horacích domacích Spotřebicí.Plyn, 1976.V56.S/ 8-14.
25. Лисиенко В.Г., Щелоков Я.М., Ладыгичев М.Г. Хрестоматия энергосбережения: Справочное издание: В 2-х томах. Книга 2/ Под ред. В.Г.Лисиенко. – М.: Теплоэнергетик, 2002.– 768с.
26. Повышение производительности и улучшение качества агломерата при спекании шихты в высоком слое с повышенным разряжением. / Б.М.Носовицкий, А.Г. Барушинский, В.И.Ростовский, Г.С. Княгин.// Сталь, 1979, №10, с. 738-741.
27. Влияние способа подачи топлива разных видов на показатели процесса агломерации./ Г.Г.Ефименко, А.К.Рудаков и др.// Сталь,1976, №3, с.100-104.
28. Шурхал В.А. Внешний нагрев при агломерации. – Киев: Наукова думка. 1995. 226с.
29. А.С. СССР № 4307937, МКИ, С22В 1/16. Способ агломерации железной шихты./ В.М.Долгополов, В.Д. Журанов, В.И.Лобанов, В.И.Матюхин.
30. Агломерация вакуумно-дутьевым способом. / В.И.Раков, В.И.Матюхин, А.В.Сокол и др.// Материалы международной научно-технической конференции «Новые и усовершенствованные технологии для окискования сырья и производства чугуна и ферросплавов», Болгария, 1990.145 с.

31. Карабасов Ю.С., Валавин В.С. Использование топлива при агломерации. – М.: Metallurgy, 1976. 264с
32. Повышение производительности агломашин за счет обогащения просасываемого воздуха кислородом. // Shibata ratsuhiro/ Тэцу тохагане. I. Iron and Steel Inst. Jap./1986,v72,№12, p.795 (яп).
33. Бабушкин Н.М., Шамарин В.А., Луговых И.В. Окускование тонкоизмельченных марганцевых концентратов./ Сталь, 1960, №2, с.97-104.
34. Лисиенко В.Г., Лобанов В.И., Китаев Б.И. Теплофизика металлургических процессов. М.: Metallurgy, 1982. – 240с.
35. Ярошенко Ю.Г., Матюхин В.И., Матюхин О.В. Разработка и внедрение основ гибкой технологии обжига и спекания кусковых материалов при использовании слоевого способа сжигания газообразного топлива./ Материалы второй межвузовской конференции «Фундаментальные проблемы металлургии». –Екатеринбург, 2000, с.96-98.
36. Неясов А.Г., Цверлинг А.Р. Влияние крупности компонентов агломерационной шихты на некоторые показатели процесса спекания. – Сталь, 1960, №9.
37. Сырье для черной металлургии: Справочное издание: в 2-х т.Т.1.Сырьевая база и производство окускованного сырья (Сырье, технология, оборудование)/ М.Г.Ладыгичев, В.М.Чижикова, В.И.Лобанов и др. – М.: Машиностроение – 1, 2001.-896с.
38. Теплофизические свойства топлив и шихтовых материалов черной металлургии. Справочник./ В.М.Бабошин, Е.А.Кричевцев, В.М.Абзалов и др. – М.: Metallurgy, 1982. 152с.
39. Бабушкин Н.М., Миллер В.Я. Влияние вида и крупности топлива на скорость процесса и качество агломерата. Сталь, 1962, №2.
40. Ефименко Г.Г., Ефимов С.П. Распределение углерода при окомковании агломерационной шихты. Изв. Вузов. ЧМ., 1967, №4.
41. Современные горелочные устройства (конструкции и технические характеристики): Справочник./А.А.Винтовкин, М.Г.Ладыгичев, В.Л.Гусовский, А.Б.Усачев. М.: Машиностроение.2001. 469с.
42. Горелочные устройства обжиговых агрегатов металлургического производства. /А.А.Винтовкин, В.М.Удилов. Челябинск: Metallurgy. 1991. 336с.
43. Справочник по обогащению руд. В 3-х томах. Под ред. О.С.Богданова. Т.2. Основные и вспомогательные процессы. М.: Недра. 1974. 452с.
44. Теплотехнические расчеты металлургических печей. Под ред. А.С.Телегина. М.: Metallurgy. 1970. 528с.
45. Китаев Б.И., Ярошенко Ю.Г., Сучков В.Д. Теплообмен в шахтных печах. М.: Metallurgizdat.1957. 280с.
- 46.Теплотехника окускования железорудного сырья. Под ред. С.Г.Братчикова. М.: Metallurgy. 1970. 344с.