

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ**

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

*На правах рукописи*

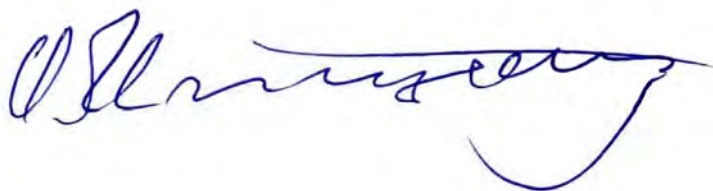
**Асламова Яна Юрьевна**



**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СЛОЯ ВЫСОКООФЛЮСОВАННОЙ  
ШИХТЫ И ТЕХНОЛОГИИ ЕГО ФОРМИРОВАНИЯ НА  
АГЛОМЕРАЦИОННОЙ МАШИНЕ**

**Специальность 05.16.02 – Metallургия чёрных, цветных и  
редких металлов (технические науки)**

**Диссертация**  
на соискание учёной степени  
кандидата технических наук



Научный руководитель:  
канд. техн. наук, ст. науч. сотр.  
И.М. Мищенко

Идентичность всех экземпляров диссертации ПОДТВЕРЖДАЮ:  
Учёный секретарь диссертационного совета Д 01.019.03,  
д-р техн. наук, профессор



А.В. Яковченко

г. Донецк – 2020

**СОДЕРЖАНИЕ**

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	5
<b>РАЗДЕЛ 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЗАГРУЗКИ ШИХТЫ И ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКООФЛЮСОВАННОГО АГЛОМЕРАТА</b> .....	12
1.1. Способы и устройства загрузки шихты на агломашины, анализ показателей их работы.....	13
1.2. Современные представления о рациональной технологии загрузки шихты на агломерационные машины.....	21
1.3. Влияние распределения шихты по высоте и ширине загруженного на агломашину слоя на газодинамические и температурно-тепловые условия и показатели процесса спекания шихты.....	24
1.4. Актуальность совершенствования процессов подготовки и спекания высокоофлюсованных шихт.....	30
Выводы.....	32
<b>РАЗДЕЛ 2. МЕТОДИКИ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ ЗАГРУЗКИ И СПЕКАНИЯ ВЫСОКООФЛЮСОВАННОЙ АГЛОШИХТЫ</b> .....	34
2.1. Методика определения основных свойств шихты и ее компонентов.....	34
2.2. Методики исследования параметров распределения шихты в загрузочной воронке и на агломашине.....	36
2.3. Методика лабораторного исследования газопроницаемости слоя шихты.....	40
2.4. Методика статистического анализа показателей работы агломашин.....	45
Выводы.....	47

<b>РАЗДЕЛ 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СПЕКАНИЯ ВЫСОКООФЛЮСОВАННОЙ ШИХТЫ В УСЛОВИЯХ АГЛОЦЕХА ЕНАКИЕВСКОГО МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ЗАВОДА .....</b>	<b>48</b>
3.1. Информационно-аналитическая база для исследования показателей спекания высокоофлюсованных шихт.....	48
3.2. Анализ шихтово-технологических условий и параметров спекания высокоофлюсованной шихты .....	52
3.3. Оценка влияния компонентного состава шихт и основных технологических факторов на прочность высокоофлюсованного агломерата.....	57
<b>Выводы .....</b>	<b>64</b>
<b>РАЗДЕЛ 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ СЛОЯ ВЫСОКООФЛЮСОВАННОЙ ШИХТЫ НА АГЛОМАШИНЕ .....</b>	<b>65</b>
4.1. Исследование распределения шихты в загрузочной воронке и на агломашине .....	65
4.1.1. Распределение шихты в загрузочной воронке агломашинны .....	68
4.1.2. Исследование параметров укладки слоя высокоофлюсованной шихты на агломашине .....	73
4.2. Исследование влияния способа загрузки высокоофлюсованной шихты на газопроницаемость слоя на агломашине методом физического моделирования.....	78
4.3. Обоснование рациональных параметров слоя высокоофлюсованной шихты на агломашине .....	87
4.3.1. Высота формируемого на агломашине слоя шихты.....	87
4.3.2. Технологически рациональное и относительно стабильное во времени распределение по высоте слоя гранулометрического состава шихты, основности, горючего углерода .....	89
4.3.3. Насыпная плотность шихты.....	93
4.4. Расчет профиля шихты на агломашине .....	94
<b>Выводы .....</b>	<b>100</b>

<b>РАЗДЕЛ 5. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЗАГРУЗКИ ШИХТЫ НА АГЛОМАШИНУ</b> .....	102
5.1. Совершенствование распределения шихты в загрузочной воронке и на агломашине .....	102
5.2. Уплотнение и заглаживание верхних слоев шихты .....	108
5.3. Влияние рационального распределения шихты по ширине слоя на газодинамическую работу агломашинны .....	114
5.4. Влияние рационального распределения шихты по ширине слоя на тепловую работу колосников и подколосниковых балок паллет .....	121
5.5. Экономическая и социально-экологическая эффективность применения усовершенствованной технологии загрузки шихты на агломашину .....	122
Выводы .....	128
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	131
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	134
Приложение А. Документы, подтверждающие внедрение результатов диссертационной работы .....	151

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Преобладающая часть продукции аглофабрик мира – это агломераты повышенной и высокой основности, использование которых в доменной плавке обеспечивает значительную экономию кокса, самого дорогого и дефицитного компонента доменной шихты. Более четырёх десятилетий агломераты высокой основности производят в агломерационном цехе Енакиевского металлургического завода (ЕМЗ), технический уровень которого в настоящее время не соответствует многим современным требованиям. Доступным и не требующим значительных материальных затрат способом совершенствования технологии производства агломерата на ЕМЗ является модернизация технологической операции загрузки шихты на агломашину, при которой обеспечиваются рациональные параметры формируемого слоя, достигается улучшение основных показателей производства агломерата.

Основные параметры слоя шихты на агломашине ЕМЗ – это его высота в диапазоне 350-380 мм с увеличением её в направлении бортов паллет на 50-70 мм; рациональное распределение гранулометрического состава, горючего углерода и основности шихты по высоте и ширине слоя шихты; близкие значения насыпной плотности шихты верхней и средней частей слоя и т.д.

Обеспечение рациональных параметров слоя путём совершенствования технологической операции загрузки шихты на агломашину гарантирует улучшение показателей агломерации, что позволяет считать выбранную тему диссертационной работы весьма актуальной.

**Степень разработанности темы.** Разделы теории и практики подготовки и агломерации шихт различной основности в условиях отечественных предприятий освещены в трудах Е.Ф. Вегмана, В.А. Уткова, Ф.Ф. Колесанова, Ю.А. Фролова, Г.В. Коршикова, В.П. Хайдукова, В.П. Тарасова, С.В. Кривенко, Ю.С. Юсфина, И.М. Мищенко, Н.С. Хлапониной и других учёных. Однако исследования технологии загрузки и спекания высокоофлюсованных шихт выполнены в ограниченном

объёме.

**Цели и задачи исследования.** Обоснование рациональных параметров формируемого на агломашине слоя высокоофлюсованной шихты; разработка практических рекомендаций по проектированию модернизированного загрузочного устройства и совершенствованию на этой основе технологии загрузки шихты, направленной на повышение прочности агломерата, снижение расхода твёрдого топлива на процесс спекания, повышение срока службы паллет, улучшение экологической ситуации в зоне расположения агломерационного производства.

Для достижения указанных целей поставлены следующие задачи:

1. Определить закономерности распределения гранулометрического состава шихты по ширине загрузочной воронки и агломашинны.
2. Выполнить анализ особенностей технологии спекания высокоофлюсованной шихты, в том числе с её изменяемой насыпной плотностью; обосновать рациональные параметры формируемого на агломашине слоя шихты.
3. Разработать рекомендации по проектированию модернизированной конструкции загрузочного устройства и совершенствованию технологической операции загрузки шихты.
4. Разработать усовершенствованный технологический регламент регулирования (выравнивания) скорости спекания шихты по ширине агломашинны.

**Объект исследования.** Технологическая операция загрузки шихты на агломашину при производстве высокоофлюсованного агломерата на ЕМЗ.

**Предмет исследования.** Закономерности формирования слоя высокоофлюсованной шихты в бесчелноковой загрузочной воронке и на агломашине, рациональные параметры загружаемого на агломашинны слоя шихты.

**Научная новизна полученных результатов.**

1. Получило дальнейшее развитие представление о распределении гранулометрического состава высокоофлюсованной шихты по ширине загрузочной воронки бесчелнокового загрузочного устройства и, соответственно, по ширине агломашинны. Показано, что в загрузочной воронке агломашинны

происходит нежелательная сегрегация шихты по двум, относительно поперечной оси воронки, наклонным криволинейным поверхностям, сформированным окомкованной полидисперсной шихтой при её перегрузке из барабана-окомкователя в центр загрузочной воронки. Содержание фракций более 5 мм в шихте у боковых стенок загрузочной воронки на 55-60% (отн.) выше, чем в центре. Зависимость расчётного изменения газодинамического сопротивления слоя шихты высотой 350 мм по ширине воронки представляет собой подобие выпуклой параболы. Экспериментально установлено, что структура слоя, образовавшегося в загрузочной воронке, синхронно передается на агломашину, что ведет к формированию на ней слоя, газопроницаемость которого в направлении от центра к периферии увеличивается минимум на 12-15%.

**2. Получили дальнейшее развитие представления о механизме выравнивания скорости спекания высокоофлюсованной шихты по ширине агломашинны за счёт выравнивания газодинамического сопротивления слоя шихты по его ширине.** Плавное увеличение высоты слоя от 350-380 мм в центральной зоне агломашинны до 400-430 мм у её бортов обеспечивает формирование слоя с вогнутопараболической поверхностью, благодаря чему удельное газодинамическое сопротивление прибортовой части слоя шихты увеличивается на 400-500 Па/м и приближается к значению газодинамического сопротивления слоя центральной зоны. Вертикальная скорость спекания в прибортовой зоне агломашинны уменьшается на 5,0-5,5 мм/мин, обеспечивая, вместе с тем, общее увеличение скорости процесса спекания. Происходит рациональное перераспределение всасываемого воздуха по ширине спекаемого слоя шихты на агломашине.

**3. Получило дальнейшее развитие представление о влиянии насыпной плотности верхнего горизонта слоя высокоофлюсованной шихты на параметры процесса спекания и прочность агломерата.** Показано, что при рациональном увеличении насыпной плотности на 150-160 кг/м<sup>3</sup> удельный расход тепла на зажигание топлива шихты сокращается на 7,0-7,5%, изменение скорости фильтрации газа по ширине слоя при спекании не превышает 0,05-0,07 м/с, температура отходящих газов в конце зоны спекания по ширине агломашинны отличается не

более чем на  $50^{\circ}\text{C}$ . Содержание в агломерате фракции менее 5 мм сокращается на 1,0-1,5% (абс.).

**4. Получило дальнейшее развитие представление о влиянии скорости фильтрации газов и, следовательно, скорости спекания шихты на прочность высокоосновного агломерата.** При аномально низкой скорости спекания шихты 8-9 мм/мин содержание фракции менее 5 мм в агломерате основностью 2-5 абс. ед. может достигать 12,8-17,5%. Объясняется это улучшением газодинамического режима спекания, при котором даже при замедленном горении топлива обеспечивается уровень температур  $1200-1230^{\circ}\text{C}$ , достаточный для плавления высокоофлюсованной шихты. Замедление в два раза скорости фильтрации газов увеличивает время пребывания расплава при высоких температурах, способствует более полному переходу расплава в спек, снижению межфазовых напряжений и, в итоге, уменьшению содержания в агломерате фракции менее 5 мм на 1,0-1,5% (абс.).

**5. Получили дальнейшее развитие представления о сегрегации твёрдого топлива в слое высокоофлюсованной шихты при её загрузке на агломашину.** Установлено, что степень сегрегации твёрдого топлива шихты в верхние горизонты слоя возрастает на 0,2-0,3% (абс.) по мере повышения основности шихты на 1,0-1,5 абс. ед. от исходной 1,3-1,4 абс.ед. Это, в частности, обусловлено увеличением в шихте в 1,5-2,5 раза массовой доли частиц известняка, которые по сравнению с частицами твёрдого топлива обладают большей плотностью, массой и скоростью движения по плоскости загрузочного лотка к откосу формируемого на агломашине слоя шихты.

#### **Теоретическая значимость работы.**

1. Выявлены причины и определены зоны слоя с неравномерным распределением скорости спекания высокоофлюсованной шихты на агломашине площадью спекания  $62,5 \text{ м}^2$ . Неблагоприятный характер сегрегации высокоофлюсованной шихты в загрузочной воронке приводит к неравномерному спеканию шихты по ширине слоя на агломашине.

2. Показано, что предложенный в работе способ формирования слоя позволяет выровнять скорость спекания шихты по ширине агломашинны путём плавного



увеличения высоты слоя в периферийных зонах и придания профилю слоя такой формы, которая соответствует кривой, отражающей изменение газодинамического сопротивления слоя шихты по ширине загрузочной воронки.

3. Обоснована возможность получения в аглоцехе ЕМЗ достаточно прочного агломерата основностью 2-5 абс. ед. при низкой скорости спекания. При малой скорости фильтрации газов, медленном горении топлива в слое достигаются температуры и продолжительность процессов, которые являются достаточными для плавления высокоофлюсованной шихты и более полной кристаллизации расплава при медленном его охлаждении, что снижает внутренние напряжения в спеке и способствует повышению прочности агломерата.

### **Практическая значимость работы.**

1. Разработаны и переданы ЕМЗ рекомендации по совершенствованию технологии загрузки высокоофлюсованной шихты на агломашину, направленные на обеспечение формирования слоя с рациональными технологическими параметрами.

Суть рекомендаций состоит в следующем:

а) формирование на агломашине слоя с вогнутопараболической поверхностью, высотой в центральной зоне 350-380 мм и плавным увеличением высоты в направлении бортов на 50-70 мм;

б) создание условий для сегрегации шихты, обеспечивающей рациональное распределение по высоте слоя грансостава, твёрдого топлива и основности;

в) уплотнение верхних горизонтов и заглаживание поверхности слоя шихты с целью рационального увеличения её насыпной плотности на 150-160 кг/м<sup>3</sup> и повышения прочности верхней части аглоспека.

Внедрение рекомендаций на ЕМЗ позволяет сократить расход твёрдого топлива на процесс спекания на 3-5 кг/т агломерата, снизить содержание в агломерате фракции менее 5 мм на 1-2% (абс.); возможно повышение производительности агломашин на 7-10%. Ожидаемый экономический эффект составляет 11,35 млн. руб./год. Долевое участие соискателя – 5%, то есть 567,5 тыс. руб.

2. Разработана усовершенствованная конструкция и обоснованы параметры

элементов загрузочного комплекса шихты на агломашину. Предусмотрены установка в барабане-окомкователе направляющих элементов, оснащение загрузочной воронки качающимся распределителем шихты; применение двухступенчатого загрузочного лотка модернизированной конструкции и специальной гладилки, что в совокупности обеспечивает формирование слоя с заданными рациональными параметрами и достижение необходимых показателей процесса спекания.

3. На основе статистической обработки данных о показателях работы агломашин получены эмпирические уравнения для прогнозирования содержания фракции менее 5 мм в агломерате.

4. Научные результаты, полученные в диссертационной работе, используются в курсе «Технология подготовки железорудного сырья» при подготовке магистров по направлению подготовки 22.04.02 «Металлургия», магистерская программа «Металлургия чугуна».

**Методология и методы исследования.** Исследования основывались на положениях теории окускования железорудного сырья, стандартных и специально разработанных методиках определения свойств аглошихты и её компонентов, методах математической статистики при обработке результатов, лабораторных и опытно-промышленных исследованиях технологической операции загрузки шихты на действующих агломашинах. Статистическую обработку производственных данных и построение графиков производили с помощью программы Microsoft Excel.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Рациональные параметры слоя высокоофлюсованной шихты, формируемого на агломашине.

2. Закономерности распределения гранулометрического состава шихты по ширине загрузочной воронки и агломашины.

3. Способы совершенствования распределения высокоофлюсованной шихты по ширине слоя, улучшения её сегрегации, выравнивания скорости спекания по ширине агломашины.

4. Способ увеличения насыпной плотности верхних горизонтов слоя шихты

до плотности среднего горизонта для повышения прочности агломерата.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность и новизна научных и технических решений, обоснованность выводов и рекомендаций работы подтверждаются корректным использованием апробированных методов исследования и научных теорий, результатами экспериментальных исследований в промышленных условиях, сопоставлением результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Основные положения диссертации доложены и обсуждены на конференциях: научно-практической «Донбас-2020: Перспективы розвитку очима молодих вчених» (г. Донецк, май 2010 г.); международной «Университетская наука 2010» (г. Мариуполь, май 2010 г.); форуме «Екологія промислового регіону» (г. Донецк, май 2012 г.); республиканской «Комплексное использование природных ресурсов» (г. Донецк, декабрь 2016 г.); международной «Научно-технический прогресс в чёрной металлургии – 2019» (г. Череповец, сентябрь 2019 г.), двух международных «Металлургия XXI века глазами молодых» (г. Донецк, май 2019 г., май 2020 г.); на научных семинарах кафедры «Руднотермические процессы и малоотходные технологии» (РТПиМТ) ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (г. Донецк, 2019 г., 2020 г.).

**РАЗДЕЛ 1.****СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЗАГРУЗКИ ШИХТЫ И  
ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКООФЛЮСОВАННОГО АГЛОМЕРАТА**

Агломерат является основным видом подготовленного железорудного сырья для доменной плавки и значительное улучшение его металлургических свойств наряду с улучшением показателей качества железорудных окатышей и металлургического кокса, как правило, обеспечивают кардинальное улучшение технико-экономических и экологических показателей выплавки чугуна в доменных печах, а одновременно, по принципам взаимного влияния, и в смежных производствах агломерата и кокса [1-6].

Современным эколого-экономическим принципом развития горно-металлургического комплекса, а особенно наиболее экологически опасных агломерационного и коксохимического производств, в меньшей мере доменного производства, является обязательное внедрение технологий, минимизирующих загрязнение окружающей среды вследствие применения системы BAT (Best Available Technology – наилучшие доступные технологии) в соответствии с международными стандартами серий ISO 14000 и ISO 9000 [7].

Для агломерационного производства следование по пути экологических стандартов – это внедрение технологий, направленных на улучшение основных показателей агломерации: повышение прочности агломерата, других его металлургических свойств, уменьшение расхода топлива на процесс спекания, снижение вредных выбросов, сбросов и формирования отходов [8].

На отечественных предприятиях, как отмечено в работе [4], показатели качества подготовки сырья к доменной плавке ниже, чем в лучших зарубежных странах. В агломерате аглофабрик Донбасса на 5-6% ниже содержание железа, выше содержание мелких фракций из-за пониженной его прочности, в связи с чем расход рудного сырья на 200-300 кг/т чугуна выше, чем за рубежом. Отсюда –

ниже производительность доменных печей, выше расход кокса и существенно выше себестоимость выплавленного чугуна [9, 10].

Для черной металлургии ДНР актуальна разработка и внедрение мероприятий, направленных на улучшение технико-экономических показателей работы и повышение экологической безопасности агломерационного цеха Енакиевского металлургического завода (ЕМЗ). Основанное на прогрессивных технологиях и адаптированное для условий ЕМЗ совершенствование технологии загрузки шихты на агломашину – один из доступных для реализации способов повышения эффективности агломерационного производства предприятия.

### **1.1. Способы и устройства загрузки шихты на агломашину, анализ показателей их работы**

Разработка систем загрузки шихты на агломашину за почти вековую историю развития отечественного агломерационного производства, в основном завершена созданием комбинированного загрузочного устройства, в состав которого входят: челноковый распределитель шихты, загрузочная воронка, барабанный питатель, загрузочный лоток и выравнивающая поверхность слоя шихты гладилка (рисунок 1.1).

Такими устройствами оснащены все агломашину отечественного агломерационного производства с площадью спекания  $75 \text{ м}^2$  и более. Комбинированные загрузочные устройства агломашин площадью спекания  $62,5 \text{ м}^2$  не имеют челноковых распределителей шихты; применяемые ранее маятниковые распределители давно демонтированы из-за их низкой эксплуатационной надежности и невысокой технологической эффективности.

Агломашину большей мощности с площадью спекания  $312 \text{ м}^2$  дополнительно оборудованы устройствами для загрузки слоя постели на колосниковую решетку паллет и для загрузки двух слоев шихты (в случае сохранения двухслойной загрузки, например, на Западно-Сибирском металлургическом комбинате) [1].

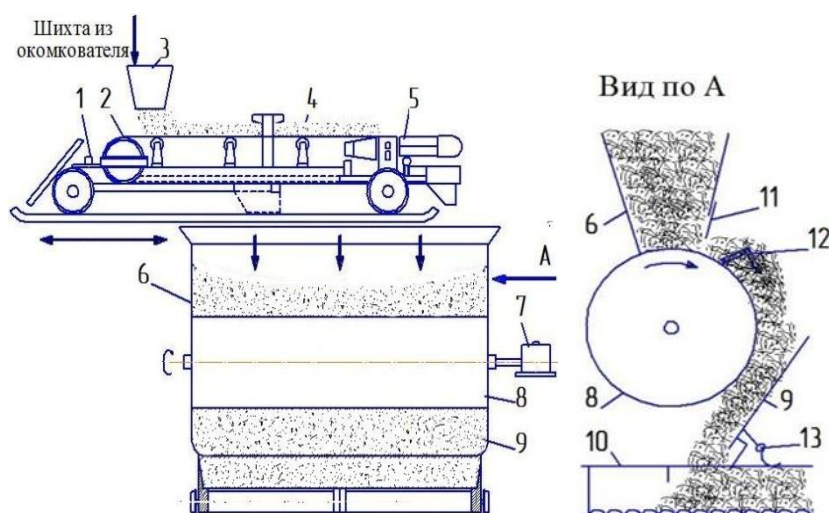


Рисунок 1.1. Схема комбинированного загрузочного устройства агломашины [1]:

- 1 – челноковый распределитель; 2 – резиновая лента распределителя;  
 3 – желоб перегрузки окомкованной шихты; 4 – слой шихты на ленте;  
 5 – привод ленты конвейера; 6 – перегрузочный бункер; 7 – привод барабанного питателя; 8 – барабанный питатель; 9 – загрузочный лоток; 10 – паллета;  
 11 – шиберная заслонка; 12 – стабилизатор потока шихты;  
 13 – гладилка поверхности слоя

Отметим резкое ослабление интереса и отказ от некогда популярной двухслойной загрузки шихты в связи с многолетними исследованиями Г.В. Коршикова, А.В. Малыгина и других ученых [11-16]. Они пришли к выводам, подтверждающим ее невысокую эффективность по сравнению с однослойной загрузкой.

Типовое загрузочное устройство агломашин малой, средней и большой мощности предназначено для выполнения двух основных задач [17]:

а) обеспечение многослойной, усреднительной укладки в загрузочной воронке загрузочного устройства окомкованной шихты, падающей неоднородным, рассредоточенным потоком из барабана-окомкователя в направляющий желоб и далее на конвейерную ленту челнокового распределителя шихты;

б) обеспечение рационального распределения гранулометрического состава шихты, твердого топлива и флюсующих добавок шихты по высоте и ширине загружаемого на агломашину слоя.

В системе загрузки шихты на агломашины, как правило, действует технологический регламент выделения из шихты или агломерата необходимых фракций естественной или искусственной защитной «постели», укладываемой на колосники паллет слоем толщиной не менее 30-40 мм [18].

При выполнении второй задачи (пункт б) используется процесс сегрегации шихты, без которого невозможно создать необходимую структуру слоя и провести нормальное, достаточно эффективное спекание шихты [11, 19, 20].

На рисунке 1.1 [1] четко прослеживается влияние сегрегации на распределение классов крупности 0-3 мм, горючего углерода, основности шихты по высоте уложенного на агломашину слоя. Видно, что данные характеристики шихты по высоте слоя изменяются практически линейно. Это благоприятно влияет на условия последующего спекания. Особенно ценным является увеличение почти вдвое содержания углерода топлива в шихте верхних горизонтов слоя, где, как известно, ощущается большой дефицит тепла, обусловленный недостаточной его регенерацией в начальных стадиях процесса. Выравнивание температурно-теплового режима по высоте спекаемого слоя позволяет снижать общую концентрацию топлива в шихте и его расход на тонну агломерата. В зависимости от условий спекания экономия твердого топлива только по линии улучшенной сегрегации шихты может достигать 3-5% и более [1, 21].

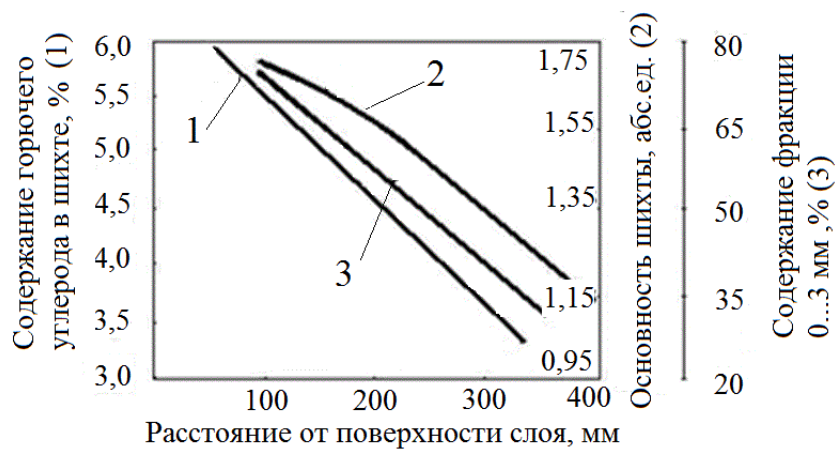


Рисунок 1.1. Изменение крупности и химического состава шихты по высоте слоя [1]

Топливо нормальной крупности 0-3 мм сосредоточено в основном в самых мелких фракциях шихты (менее 3 мм), в которых содержание горючего углерода достигает 60% и более при среднем в шихте 3,5-3,8% (абс.). Тонкие классы крупности топлива менее 0,5 мм входят в одинаковых количествах в состав как самых мелких, так и крупных фракций шихты. Увеличение верхнего предела крупности топлива переводит его в состав более крупных фракций шихты, что является нежелательным [22].

Конструкции современных загрузочных устройств агломашин во многом сходны, поскольку ориентированы на выполнение практически одинаковых задач. Приведем основные примеры модификации типового загрузочного устройства агломашин, широко применяемого во многих странах мира (рисунок 1.1).

Предпринимались попытки модификации челнокового распределителя шихты, загрузочной воронки и, особенно, загрузочного лотка [17]. В сущности, тех механизмов и узлов, которые обеспечивают рациональное распределение шихты по высоте и ширине загружаемого на агломашину слоя. Методика исследований показателей работы челнокового распределителя шихты и выводы, полученные в ходе таких исследований, представлены в работах В.И. Коротича и Ю.А. Фролова [23-25]. Оказалось, что многие режимы его работы не обеспечивают идентичные гранулометрический состав и газопроницаемость шихты, уложенной по длине загрузочной воронки, а значит – по ширине слоя на агломашине. Периферийные зоны сформированного в воронке слоя обладают большей газопроницаемостью. По данным промышленных исследований [26-33] скорость спекания шихты на периферии слоя выше, чем в центральной части агломашин. Потери производительности агломашин могут достигать по этой причине 8-10% [34]. Кроме того, ускоренное спекание шихты в периферийной области паллет приводит к такому же ускоренному износу периферийных частей подколосниковых балок, к их деформации, возникающей из-за перепада в них температур по ширине спекательных тележек. Это вынуждает проводить частый ремонт и замену паллет.



На практике применяют несколько способов преодоления последствий неравномерного спекания шихты по ширине слоя на агломашине [17]:

- рациональное формирование слоя шихты в загрузочной воронке, определяемое опытным путем по визуальной картине излома спека в хвостовой части агломашины, а также по значениям температур отходящих газов по ширине предпоследней вакуум-камеры агломашины;

- повышение газодинамического сопротивления слоя шихты в периферийной части паллет путем установки колосников без зазоров и сплошных плит у бортов паллет; путем применения фигурных и наклонных бортов паллет.

Отработке режимов работы челнокового распределителя шихты уделяется повышенное внимание [35]. Разработаны, в частности, математические модели для анализа и управления его работой [24, 36].

Загрузочные воронки должны быть футерованы антиадгезионными материалами, так как на формирование слоя на агломашине отрицательно влияет налипание шихты на стенки загрузочной воронки. Рисунок 1.3 иллюстрирует ситуацию, имеющую место в воронке агломашины АКМ-312 Новолипецкого металлургического комбината. Ее следствием является уменьшение рабочего объема воронки, в результате сокращается продолжительность остановок челнокового распределителя у ее боковых стенок, следовательно, шихта нерационально распределяется по ее длине, а затем и по высоте слоя на агломашине.



Рисунок 1.3. Загрузочная воронка агломашины Новолипецкого металлургического комбината [17]

Наряду с установкой в загрузочной воронке противoadгезионных и антифрикционных покрытий предложены варианты модификации шибера (установленных вместо отклоняющихся заслонок), регулирующих расход шихты, перегружаемой из воронки на загрузочный лоток [17]. Для увеличения периферийных потоков шихты предусмотрены боковые треугольные вырезы регулирующего шибера.

В работе [37] показано, что увеличение высоты слоя шихты на периферии паллет привело к выравниванию скорости спекания шихты по ширине агломашины и обеспечило: рост производительности от 1,75 до 1,83 т/(м<sup>2</sup>·ч), снижение расхода топлива от 48,2 до 45,4 кг/т агломерата, повышение индекса восстановимости (RI) от 63,7 до 68% (абс.), и индекса прочности агломерата после восстановления (RDI+6) от 37,9 до 39% (абс.).

По рекомендациям, приведенным в работах [25, 38, 39], на агломашинах ряда предприятий применяются стабилизаторы потока шихты (рисунок 1.4). Их использование способствует повышению равномерности потока шихты, снижению динамических нагрузок при падении шихты на загрузочный лоток, повышению степени сегрегации и порозности слоя шихты. При большей порозности (газопроницаемости) слоя появляется возможность увеличения на 20-30 мм его высоты, что влечет за собой снижение расхода топлива на 3-4%, увеличение выхода годного и производительности процесса.

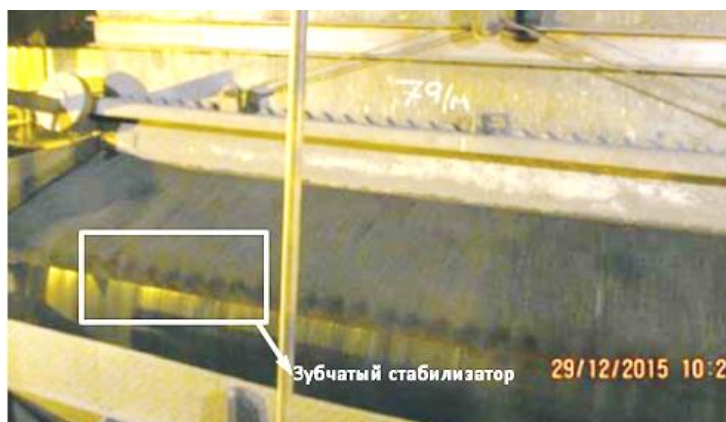


Рисунок 1.4. Зубчатый стабилизатор потока шихты агломашины АКМ-312/336 (завод «АрселорМиттал Темиртау», Карагандинская обл., Казахстан) [34]

В 70-ые годы прошлого века на агломашинах МК «Запорожсталь» барабанные питатели заменили электровибрационными. Первые исследования показателей работы этих питателей показали существенное улучшение степени сегрегации шихты и топлива по высоте слоя. Газопроницаемость спекаемого слоя возросла на 18%, что позволило по данным авторов исследования увеличить высоту слоя шихты на 100 мм – от 290 до 390 мм при снижении скорости спекания шихты всего на 6,4% [40, 41].

Но, вывод авторов о такой возможности увеличения высоты слоя исключительно благодаря улучшению сегрегации шихты представляется некорректным. Отметим, что в этот период работы аглофабрики возможности увеличения высоты спекаемого слоя были обусловлены также тем, что расход свежей извести – мощного интенсификатора спекания шихты, достигал 80-90 кг/т агломерата, газодинамические сети агломашин находились в хорошем состоянии, текущие простои агломашин составляли 0,3-0,5% от календарного времени. Кроме того, в течение последних десятилетий, по мере изменения шихтовых и прочих условий, общего старения оборудования выявился ряд недостатков в работе электровибрационного питателя.

В начале 80-х годов прошлого столетия на некоторых предприятиях отрасли успешно испытан в продолжительной эксплуатации двухступенчатый загрузочный лоток агломашины (рисунок 1.5) в соответствии с патентом Н.С Хлапониной, И.М. Мищенко и др. [42]. Предложенная конструкция лотка устраняет недостаток, связанный с образованием на нижней кромке загрузочного лотка гребня шихты высотой 50-70 мм, нарушающего сегрегационные процессы. Благодаря применению двухступенчатого лотка улучшена сегрегация шихты, увеличена высота слоя и за счет этого снижены расход твердого топлива на 2% (абс.) и массовая доля мелких фракций в агломерате на 1,2% (абс.).

Для улучшения сегрегационных показателей работы обычного загрузочного лотка на некоторых аглофабриках увеличили его длину на 400-500 мм [17]. Выводы, полученные при исследовании влияния длины и угла наклона загрузочного лотка на степень сегрегации крупнозернистой шихты на агломашинах сводятся к

тому, что управлять процессом формирования слоя эффективно, прежде всего, изменением угла наклона загрузочного лотка [43, 44].

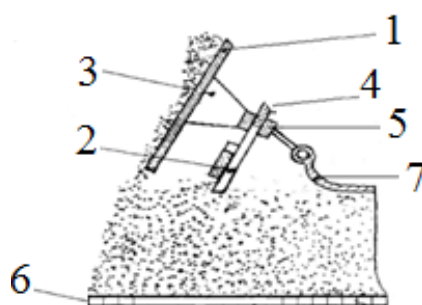


Рисунок 1.5. Схема двухступенчатого загрузочного лотка [42]:

1 – первая ступень; 2 – вторая ступень; 3 – консоль крепления второй ступени;  
4 – шток; 5 – втулка; 6 – колосниковая решетка агломашины; 7 – гладилка

На аглофабрике № 1 Бхилайского метзавода в Индии барабанный питатель подняли на 500 мм, что позволило увеличить рабочую длину лотка от 650 до 1260 мм [45]. «Индекс сегрегации» (отношение доли фракции 0-3 мм в верхнем слое к содержанию в нижнем) вырос с 1,2 до 2,0, а разница в содержании топлива в шихте вверху и внизу слоя (в элементарных слоях по 30 мм) – от 1,3 до 3,7% (абс.). Разница в величине холодной прочности агломерата вверху и внизу слоя снизилась от 10,8 до 1,3% (абс.), выход годного агломерата возрос на 2% (абс.), а скорость спекания шихты не изменилась.

Японские специалисты, исчерпав предельные «сегрегационные» возможности обычного загрузочного лотка типовых загрузочных устройств, фактически предложили сортировку шихты по крупности перед укладкой ее на агломашины [46].

В практике отечественного и зарубежного агломерационного производства ведутся патентные исследования по совершенствованию загрузочных устройств агломерационных машин [42, 47-65]. В работах [66, 67] предложено в качестве наклонного загрузочного лотка использовать магнитные сегрегационные плиты.

Подводя краткий итог проведенному анализу показателей работы загрузочных устройств на многих аглофабриках мира, в том числе и типового комбиниро-

ванного загрузочного устройства отечественных агломашин, с учетом эффективности модернизации его отдельных узлов, отметим, что усовершенствованное комбинированное загрузочное устройство может обеспечивать значительное улучшение показателей формирования слоя шихты и показателей работы агломашин. В каждом конкретном случае параметры загрузки шихты и показатели ее спекания исследуются в специальных экспериментах.

## **1.2. Современные представления о рациональной технологии загрузки шихты на агломерационные машины**

Первые соображения о рациональной технологии загрузки шихты на агломашину были опубликованы инженером С.М. Мееровым еще в 30-ые годы прошлого столетия [17]. В них подчеркнута необходимость обязательного применения защитного слоя постели, а также укладки шихты таким образом, чтобы содержание твердого топлива в верхних горизонтах слоя было максимальным, а насыпная плотность шихты не возрастала, обеспечивая повышенную порозность, а значит и газопроницаемость слоя шихты.

Последующие опытно-промышленные исследования дополнили и расширили упомянутые представления о рациональной технологии загрузки агломерационной шихты.

В работах [68-71] отмечено значительное влияние распределения шихты по крупности по высоте слоя на качество агломерата и производительность агломашин, теплотехнические и газодинамические аспекты агломерационного процесса.

В исследованиях [20, 72, 73] подробно освещены процессы сегрегации шихты, предложены методы их количественной оценки, показаны дополнительные варианты регулирования скорости спекания шихты по ширине агломашины, представлены результаты влияния рациональной загрузки шихты на основные параметры и показатели производства агломерата.

Важно подчеркнуть цели применения рациональной технологии загрузки шихты на агломашину. К ним, как правило, относятся: повышение прочности,

выхода годного агломерата, снижение расхода твердого и газообразного топлива, увеличение производительности агломашин [74-76].

Рациональная технология загрузки аглошихты обеспечивает выполнение большого перечня задач, в который входят [17, 34]:

- минимизация колебаний химического и гранулометрического составов шихты, содержания топлива в шихте по высоте и ширине слоя;

- рациональное распределение гранулометрического состава шихты и концентрации топлива по высоте слоя, при котором максимально компенсируется дефицит тепла в верхней части слоя и минимизируется его избыток в нижней;

- обеспечение минимальной дискретности (прерывистости) потока шихты при ее движении по тракту перегрузки от барабана-окомкователя до агломашин;

- формирование такой структуры слоя шихты, при которой ее насыпная плотность в верхней и средней частях слоя будет примерно одинаковой, а переуплотнение шихты в нижней части слоя будет минимальным;

- обеспечение рациональной степени сегрегации шихты, при которой достигаются необходимые показатели процесса спекания;

- минимизация степени разрушения гранул и комков шихты при перегрузках;

- обеспечение одинаковой высоты слоя шихты по ширине, и, следовательно, и по длине всей площади спекания агломашин;

- автоматическое регулирование расхода, режима движения потока шихты из загрузочной воронки до агломашин;

- рациональное выравнивание (заглаживание) поверхности слоя шихты перед зажигательным горном;

- обеспечение одновременного по ширине агломашин подхода зоны горения к нижней границе слоя, расположенного непосредственно на колосниковой решетке паллет агломашин.

На современных аглофабриках, как правило, на колосниковую решетку паллет вначале загружают так называемую защитную «искусственную постель» [17]. Авторы работы [77] предлагают для формирования рационального слоя по-

стели использовать трехслойную загрузку шихты на паллеты. Фракцию шихты крупностью более 12 мм рекомендовано использовать на колосниковой решетке в качестве постели, фракцию 6-12 мм – для формирования среднего слоя шихты, а фракции менее 6 мм – верхнего слоя.

Однако на многих аглофабриках постсоветского пространства выделяется «естественная постель» [17]. Условия для эффективного выделения в процессе сегрегации по поверхности загрузочного лотка и по откосу загружаемого слоя крупных, «постельных» фракций шихты в самую нижнюю, приколосниковую часть загружаемого слоя создают следующим образом:

а) обеспечивают наличие в готовой окомкованной шихте достаточного количества относительно крупных гранул, получаемых на основе комкующих фракций крупностью более 5-7 мм;

б) создают предпосылки для лучшей сегрегации шихты путем применения регулирующего шибера, увеличения частоты вращения барабанного питателя, применения стабилизатора потока шихты, двухступенчатого загрузочного лотка с покрытием первой ступени износостойким гибким материалом, допускающим применение пневматического обрушения налипаний шихты и обязательного удаления из шихты посторонних крупногабаритных предметов.

Исследования и практика работы аглофабрик показывают, что полученная в обычных условиях, без применения вышеуказанных мероприятий естественная постель не отвечает своему назначению [18]. Неудовлетворительное качество естественной постели нередко приводит к забиванию колосниковой решетки мелкой шихтой и расплавом (рисунок 1.6), вынуждает проводить работы по очистке колосников от залипаний.

Приведение в исправное состояние колосниковой решетки паллет агломашин является неотъемлемой частью технологии загрузки шихты на агломашину и фигурирует одним из начальных пунктов в соответствующих разделах типовой и заводских технологических инструкций по производству железорудного агломерата [78, 79].

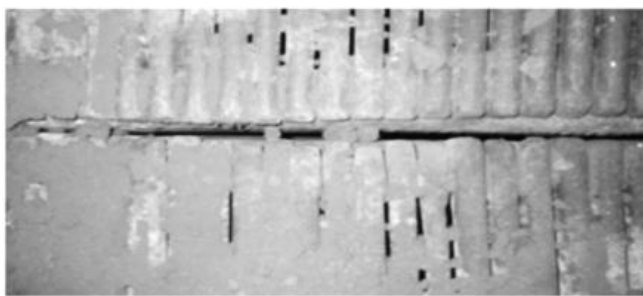


Рисунок 1.6. Фрагмент залипшей колосниковой решетки агломашины [17]

Рациональная технология формирования слоя шихты на агломашинах предусматривает модернизацию комбинированного загрузочного устройства агломашин, направленную на устранение вредных последствий неравномерной загрузки шихты по ширине агломашины.

### **1.3. Влияние распределения шихты по высоте и ширине загруженного на агломашину слоя на газодинамические и температурно-тепловые условия и показатели процесса спекания шихты**

На начальную газопроницаемость аглошихты оказывает влияние ее влажность и фракционный состав [80]. В работах [81-88] отмечается повышение скорости фильтрации газов через толщу слоя шихты в связи с улучшением ее сегрегации, повышением главного показателя структуры слоя – его порозности. Авторы работ [89, 90] указывают, что управление сегрегацией частиц подготовленной к спеканию шихты способствует повышению газопроницаемости примерно на 15%.

Порозность слоя зависит от гранулометрического состава, прочности гранул сырой шихты, совершенства технологии укладки шихты на агломерационную машину. Исходная ориентировочная величина порозности (пустотности) слоя шихты определяется по формуле [91]:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{нас}}{\rho_{каж}} \quad (1.1)$$



где  $\varepsilon$  – порозность слоя, доли ед.;

$\rho_{\text{каж}}, \rho_{\text{нас}}$  – кажущаяся и насыпная плотность шихты, кг/м<sup>3</sup>.

В.И. Коротич в работе [75], учитывая средние величины изменений насыпной плотности по высоте слоя, в том числе из-за разрушения, уминки гранул шихты, привел экспериментальную формулу расчета порозности слоя на любом его горизонте:

$$\varepsilon_i = 1 - \frac{1 - \varepsilon_H}{0,88 - \beta h_i}, \quad (1.2)$$

где  $\beta$  – степень усадки слоя с деформацией его структур, принятая для исходного состояния на уровне 0,088 ед. (диапазон: 0,080-0,095 ед);

$h_i$  – расстояние от верха слоя до соответствующего горизонта в слое, м;

$\varepsilon_H$  – начальная порозность.

По исследованиям Г.В. Коршикова [12, 81], исходная порозность загруженного на агломашину сыпучего слоя зависит, прежде всего, от количественного соотношения фракций, которые в наибольшей мере отличаются своими размерами. Так потеря давления газа в слое пропорциональна содержанию в шихте мелких классов менее 0,5 мм.

Загрузочные устройства влияют на величину порозности слоя, но в меньшей степени, чем исходный гранулометрический состав шихты. Иными словами, основа газопроницаемой структуры слоя создается на стадии качественного окомкования шихты.

Важнейшей характеристикой процесса спекания является газодинамическое сопротивление слоя, зависящее от скорости движения газа в слое, высоты и порозности слоя. При исходной высокой порозности (газопроницаемости) слоя, как правило, оказывается меньшим и его газодинамическое сопротивление в процессе спекания.

В определяющей степени потери давления газа в слое зависят от скорости и режима движения газа, характеризуемого коэффициентом газодинамического со-

противления в соответствии с уравнением Дарси-Вейсбаха [92, 93]:

$$\Delta P = \psi \cdot \frac{H \cdot \rho_{\Gamma} \cdot \omega^2 \cdot (1 - \varepsilon)}{2 \cdot d_{\text{экв}} \cdot \varepsilon^3} \quad (1.3)$$

где  $\Delta P$  – потери давления газа в слое, его газодинамическое сопротивление, кПа;

$\psi$  – коэффициент газодинамического сопротивления слоя, зависящий от режима движения газа, характеризуемого числом Рейнольдса,  $Re$ ;

$\rho_{\Gamma}$  – плотность газов, кг/м<sup>3</sup>;

$\omega$  – скорость фильтрации газов в слое, м/с;

$d_{\text{экв}}$  – эквивалентный диаметр каналов, м;

$\varepsilon$  – порозность слоя шихты, доли ед.

Роль структуры слоя, формируемой с помощью комбинированного загрузочного устройства агломашины, заключается в обеспечении его повышенной газопроницаемости, повышенной концентрации топлива, флюсов в шихте верхних горизонтов слоя, что гарантирует улучшение важнейших показателей процесса спекания.

Газопроницаемость спекаемого слоя можно существенно улучшить, если обеспечить увеличение соотношения масс наибольших и наименьших частиц от верха слоя к его нижней части [94].

В работе [95] определены возможности интенсификации процесса спекания и выравнивания температурно-теплового режима спекания за счет перераспределения частиц шихты по высоте слоя, т.е. благодаря усилению сегрегационных процессов при загрузке шихты. В работе [15] показаны рекордные возможности увеличения газопроницаемости слоя шихты (скорости фильтрации газов) на 20% исключительно благодаря повышению степени сегрегации шихты.

Положительное влияние на распределение теплоты в слое оказывает сегрегация материала по содержанию топлива в шихте от верхней части слоя к нижней

[96-99].

В ряде работ [38, 69, 100-104] отмечается, что сегрегация может оказывать отрицательное воздействие на стабильность свойств агломерата, увеличивая химическую неоднородность по высоте слоя, а наличие большого количества мелких фракций (-3 мм) в верхних горизонтах слоя ведет к повышению его газодинамического сопротивления

Экспериментальные исследования показали, что газопроницаемость слоя значительно повышается при установке загрузочного лотка под углом, равным или близким углу естественного откоса материала [96, 102]. В производственных условиях, как отмечено в работе [104], физико-механические свойства материала могут изменяться, что вызывает необходимость управления углом наклона загрузочного лотка.

В работах [94, 95, 101] показаны приемы увеличения скорости фильтрации воздуха через слой на 5-40% вследствие совершенствования режима загрузки шихты на колосниковую решетку агломашины.

Сегрегационные процессы оказывают определяющее влияние на содержание углерода топлива по высоте слоя [105, 106]. Например, в работе [105] степень сегрегации оценили по содержанию в каждом элементарном слое шихты фракций менее 1,4 мм и горючего углерода. Полученные результаты свидетельствуют о том, что содержание фракции менее 1,4 мм по краям паллет значительно меньше, чем в центре, это обусловлено практически неустраняемыми недостатками в работе челнокового распределителя шихты, рассмотренными выше.

С теплотехнической точки зрения рациональным можно считать такое распределение топлива, при котором по всей высоте слоя достигается минимально возможное отклонение максимальной температуры и количества расплава от оптимальных, примерно одинаковых их значений по высоте слоя. Распределение твердого топлива по высоте слоя зависит от распределения тепла регенерации в тепловом балансе зоны горения при ее перемещении от верха к низу слоя (рисунок 1.7 [1]). Видно, что экономия топлива возможна при увеличении высоты слоя, когда нижняя ее доля с минимальным содержанием топлива в шихте, увеличива-

ется. Принято считать, что каждые 100 мм увеличения высоты слоя сопровождаются снижением расхода топлива на 8-10% [107].

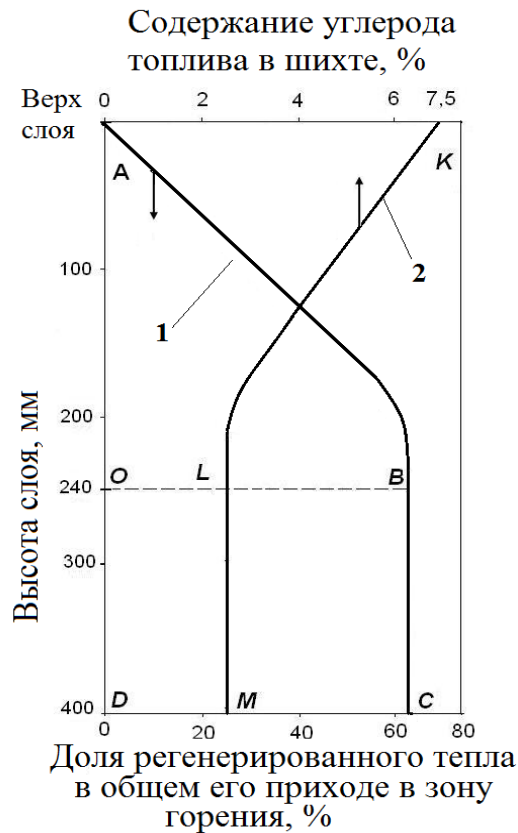


Рисунок 1.7. Изменение доли регенерированного тепла в тепловом балансе зоны горения и содержания углерода шихты по высоте слоев 240 и 400 мм [1] :  
 1 – график, характеризующий приход регенерированного тепла по мере перемещения зоны горения топлива от верхних до нижних элементарных слоев;  
 2 – график оптимального распределения углерода топлива по высоте слоя

При этом расчетная экономия топлива по линии улучшения его распределения по высоте слоя с помощью процесса сегрегации может составлять от 2,2 до 6,2 % (отн.) для слоев высотой 220 и 550 мм соответственно.

Структура уложенного на агломашину слоя шихты значительно изменяется под влиянием статических и динамических нагрузок, а также протекающих процессов в ходе спекания шихты.

Порозность слоя шихты, в основном определяющая его газопроницаемость, уменьшается, в частности, в результате усадки шихты. При этом происходит увеличение насыпной плотности шихты, исходная величина которой зависит от соотношения отдельных классов крупности, а также от массовой доли в шихте богатых концентратов и других тяжелых компонентов.

По данным [69] насыпная плотность грубозернистой шихты Орско-Халиловского металлургического комбината увеличивается сверху вниз слоя высотой всего 240 мм от 1700 до 1900 кг/м<sup>3</sup>. Существенно меньшая насыпная плотность верхнего слоя шихты сопровождается снижением прочности получаемого из этой части шихты агломерата. Авторами этой работы обосновано требование обязательного уплотнения верхнего слоя.

На одной из японских аглофабрик при регулируемом уплотнении поверхностного слоя шихты на 30 мм вниз от уровня борта паллеты достигнуто увеличение производительности агломашины с 31 до 34 т/(м<sup>2</sup>·сут.) и выхода годного агломерата из спека с 68 до 72%, несмотря на некоторое снижение скорости спекания [28]. Этот подход может служить ориентировочной мерой уплотнения верхнего слоя шихты гладилкой для крупнозернистой шихты. Автор монографии [17] указывает на возможности уменьшения переуплотнения нижней части слоя путем улучшения ситового состава и прочности гранул шихты, установки стабилизатора потока шихты, уменьшения угла наклона загрузочного лотка, снижения усадки слоя при зажигании шихты за счет, например, дросселирования потока газов в вакуум-камерах под горном.

В работах [108-112] предложены различные конструкции устройств, для выравнивания и уплотнения верхнего слоя шихты, сформированного на агломашине.

Можно констатировать, что исследователями предложен и применяется ряд методик по оценке разделения шихты по крупности по высоте слоя, однако все они имеют общий недостаток: их можно применить только к тем конкретным шихтам, на которых проводились исследования.

Этого недостатка лишена методика, предложенная в работе [38]. Ее суть состоит в том, что гранулометрический состав всех шихт можно представить тремя представительными фракциями: мелкой (0-3 мм); промежуточной (3-6 мм); крупной (более 6 мм).

Промежуточная фракция является слабо сегрегирующей, распределяясь равномерно по высоте слоя. Степень разделения фракций шихты зависит от соотношения мелкой и крупной фракций. Для грубозернистых шихт, загружаемых типовым комбинированным загрузочным устройством,  $K_{сег}$  находится в пределах 0,1-0,4 [38], а для шихт на основе тонких концентратов – менее 0,1 [17]. Методика [38] позволяет сравнивать шихты разного гранулометрического состава и проводить детальный анализ уровня сегрегации данной шихты.

#### **1.4. Актуальность совершенствования процессов подготовки и спекания высокоофлюсованных шихт**

В мировой практике применяются технологии производства агломератов повышенной (1,3-1,9 абс. ед.) и высокой (более 1,9 абс. ед.) основности для использования их в доменной плавке с целью офлюсования низкоофлюсованных окатышей [1, 113-115]. Производство полностью офлюсованных окатышей признано нецелесообразным из-за дороговизны тонкого измельчения флюсов и снижения металлургических свойств окатышей повышенной степени офлюсования.

В значительной мере развитие технологии производства высокоосновного агломерата мотивировано возможным улучшением его металлургических свойств [113, 116-119], а также, что особенно важно, – существенным улучшением экологической обстановки в районах расположения аглофабрик, доменных цехов и коксохимических заводов [1].

В отдельных работах [1, 117] обобщены опытные данные о технологии производства агломератов повышенной и высокой основности. Они сводятся, в частности, к тому, что при подготовке шихты к спеканию особое внимание должно быть уделено обеспечению требуемой крупности известняка и топлива (0-3 мм),

рациональной однородности химического и гранулометрического составов агломерационной шихты.

Специфика подбора шихтовых компонентов для производства высокоосновного агломерата, совершенствования отдельных стадий загрузки высокоосновной шихты на агломашины состоит в следующем.

1. В монографии [116] описаны случаи, когда при спекании высокоосновной шихты образующийся расплав высокой текучести способен проникать из самого нижнего элементарного слоя горения топлива – плавления шихты в щели колосниковой решетки, закрывая их монолитным, заплывающим слоем, резко ухудшающим газодинамику процесса спекания.

Устранить такое вредное явление возможно при обязательном наличии в загружаемой на агломашины шихте достаточного количества (40-50%) крупных фракций (6-10 мм) аглоруды, возврата, других материалов, способных образовать сплошной слой естественной постели высотой примерно 30-40 мм, разумеется, при обеспечении оптимальных условий сегрегации этих крупных фракций шихты в нижние горизонты слоя [119]. Оптимальные условия сегрегации, обобщенные в работе [17] и рассмотренные выше, актуальны и для высокоофлюсованных шихт.

2. При производстве офлюсованных агломератов из шихт, содержащих более 5%  $\text{SiO}_2$  в структуре спеков возможно образование при температурах выше  $1420^\circ\text{C}$  такой проблемной фазы, как высокотемпературная  $\beta$ -модификация двухкальциевого силиката  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ , обладающая полиморфизмом, то есть способностью перестройки, при охлаждении спека ниже  $675^\circ\text{C}$ , кристаллической решетки и перехода в иную,  $\gamma$ -модификацию при увеличении объема этой фазы на 11-12% [116, 120-123].

По данным Е.Ф. Вегмана [74] в локальных узлах перекристаллизации силиката возникают удельные давления, равные  $2000 \text{ кг/см}^2$ , превращающие агломерат в мелкие куски или порошок. Существует ряд способов предотвращения этого явления [116].

Анализ данных промышленного опыта производства высокоосновного агломерата [115, 121, 124-125] позволил сделать некоторые выводы:

- рудная часть шихты большинства доменных печей России состоит из 10-40% окатышей и 60-90% агломерата основностью 1,15-1,7 абс. ед. при содержании в агломерате фракции менее 5 мм 10-15%;

- в Китае и Японии производят высокоофлюсованный агломерат основностью 1,7-2,55 абс. ед., который обладает высокими показателями холодной прочности 72-75,5%, выход фракций менее 5 мм составляет 3,3-4,1% при содержании железа 55,5-58,5%.

В ходе обширных исследований [126-129] показано, что использование в шихте повышенного количества железо- и известьсодержащих отходов не является большим препятствием для производства высокоосновного агломерата удовлетворительного качества при условии их тщательной подготовки.

В ряде других публикаций также отмечена возможность получения достаточного прочного агломерата при использовании в шихте смеси вторичных ресурсов металлургического производства [130, 131].

Проведенный аналитический обзор современных литературных источников не выявил сведений о специфике технологии загрузки шихты при производстве высокоосновного агломерата. Недостаток информации обусловлен небольшим опытом промышленного освоения технологии агломерации высокоофлюсованных шихт.

## **Выводы**

1. Проведен аналитический обзор способов и устройств загрузки шихты на агломашины, рассмотрены промышленные варианты их модификации. Показано, что типовые комбинированные загрузочные устройства не в полной мере выполняют основные функции: сформированный на агломашине слой неравномерно спекается по ширине, из-за чего ухудшаются прочностные свойства агломерата и снижается производительность агломашин.

2. Обобщены современные требования к технологии формирования слоя шихты на агломашине в виде предъявляемого перечня задач, обеспечивающих



достижение важнейших целей агломерации: повышение прочности, выхода годного агломерата, увеличение производительности агломашин, снижение расхода твердого топлива и, как следствие, уменьшение выбросов в окружающую среду.

3. Проанализировано влияние технологии загрузки шихты на газодинамические и температурно-тепловые условия спекания шихты. Показаны возможности значительного увеличения газопроницаемости слоя шихты исключительно за счет повышения степени сегрегации, увеличения порозности слоя шихты.

4. Теоретический анализ литературы показал, что вопросам формирования слоя высокоофлюсованной шихты не уделено должное внимание. Имеются разрозненные сведения, в которых сформулированы общие принципы, актуальные для шихт любой основности.

5. Ввиду современных тенденций по переходу к производству высокоофлюсованных агломератов, необходимо решить следующие задачи, направленные на совершенствование заключительной операции подготовки шихты к спеканию – ее регламентированной загрузки на агломашину, а именно:

- установить факторы, оказывающие определяющее влияние на процесс агломерации и качество высокоосновного агломерата;
- исследовать технологию формирования слоя шихты в загрузочной воронке комбинированного загрузочного устройства и на агломашине;
- обосновать рациональные параметры слоя высокоофлюсованной шихты;
- усовершенствовать технологию загрузки высокоофлюсованной шихты на агломашину для выравнивания скорости спекания шихты по ее ширине;
- оценить влияние рационального распределения шихты на газодинамическую работу агломашин и тепловую работу паллет.

Основные материалы данного раздела опубликованы в работах [6, 7, 65, 107].

## РАЗДЕЛ 2.

**МЕТОДИКИ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ ЗАГРУЗКИ И СПЕКАНИЯ  
ВЫСОКООФЛЮСОВАННОЙ АГЛОШИХТЫ**

**2.1. Методика определения основных свойств шихты и ее компонентов**

*Химический и гранулометрический составы шихтовых материалов.* Эти характеристики изучали путем ситового и химического анализов проб сырья. Ситовый анализ выполняли по стандартной методике по ГОСТ 27562-87.

*Гранулометрический состав влажной шихты* определяли по методике, исключающей существенные потери влажности шихты и ее разрушение в процессе просеивания на проволочных ситах. Последовательность действий была следующая.

1. Пробу окомкованной шихты отбирали вручную в соответствии с ГОСТ 17495-80 и ГОСТ 15054-80, затем ссыпали в заранее подготовленные емкости.

2. Из емкостей отбирали пробу массой 3-5 кг для загрузки на блок составленных в вертикальную этажерку сит с квадратными отверстиями (рисунок 2.1).

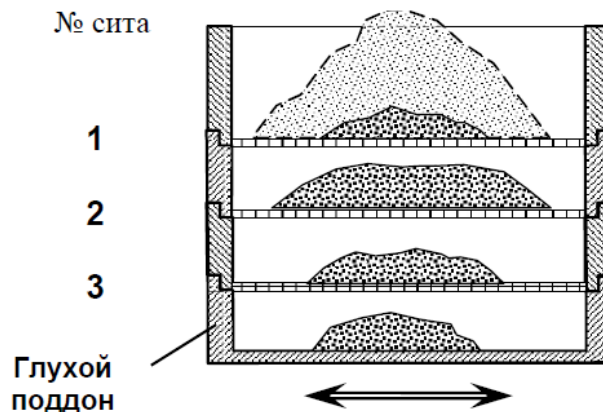


Рисунок 2.1. Схема ручного отсева окомкованной шихты

3. Засыпали на верхнее сито подготовленную усредненную пробу. Проводили рассев вручную, взяв сито в руки и совершая возвратно-поступательные движения в горизонтальной плоскости. Продолжительность отсева не менее 30 с. Для уменьшения разрушения гранул и комков шихты в процессе ручного ее отсева специально ограничивали массу (не более 3-5 кг) порций отсеваемой шихты. Порции отсеивали на ситах аккуратно, не совершая ударов и интенсивных качаний блока сит с целью исключения разрушений гранул шихты и их дополнительного окомкования за пределами окомкователя. Применяли сита со следующими размерами квадратных ячеек: 3×3, 5×5, 7×7 и 10×10 мм (рисунок 2.1).

4. Путем взвешивания на технических весах определяли массу надрешетного продукта на каждом сите.

5. Содержание каждой фракции  $g_n$  в процентах определяли по формуле:

$$g_n = \frac{m_n \cdot 100}{m} \quad (2.1)$$

где  $m_n$  – масса надрешетного продукта каждого сита, кг;

$m$  – общая масса пробы, взятая для отсева, кг.

Основной целью такого ситового анализа являлось установление гранулометрического состава шихты, а затем на его основе – проведение экспериментальных исследований и расчетов по определению газодинамического сопротивления слоев шихты, уложенных на паллеты агломашины.

Пробы из загрузочной воронки комбинированного загрузочного устройства и с агломашины отбирали вручную по методикам, описанным ниже.

*Определение насыпной плотности окомкованной аглошихты.* Насыпную плотность определяли, взяв за основу требования, приведенные в ГОСТ 25732-88. Измерения проводили сразу после отбора проб, чтобы исключить потери влажности и разрушение гранул шихты.

Опыты по определению насыпной плотности шихты выполняли три раза в такой последовательности.

1. Подготовили измерительный сосуд емкостью 1000 см<sup>3</sup>. Произвели взвешивание данной емкости.
2. Совком с высоты 20 мм засыпали в сосуд с избытком пробу шихты.
3. Избыток материала удаляли планкой.
4. Сосуд с пробой взвешивали на технических весах.
5. Насыпную плотность определяли по формуле:

$$\rho_{нас} = \frac{m_2 - m_1}{V}, \quad (2.2)$$

где  $\rho_{нас}$  – насыпная плотность аглошихты, г/см<sup>3</sup>;

$m_1$  – масса пустого сосуда, г;

$m_2$  – масса сосуда с пробой аглошихты, г;

$V$  – объем сосуда, см<sup>3</sup>.

*Прочность агломерата* по содержанию в нем фракции менее 5 мм определяли в центральной заводской лаборатории ЕМЗ согласно требованиям, приведенным в ГОСТ 15137-77.

## **2.2. Методики исследования параметров распределения шихты в загрузочной воронке и на агломашине**

Распределение шихты по крупности в загрузочной воронке и на агломашине оценивали методом ситового анализа порций шихты весом 3-5 кг, отобранных в исследуемых точках.

Отбор проб влажной шихты проводили в два последовательных приема. Вначале пробы шихты отбирали специально изготовленным совком из потока шихты, ссыпающейся с плоскости лотка вибрационного питателя, в пяти зонах: осевой, на расстоянии 650 мм от бортов лотка и у его бортов. Данные ситового анализа проб давали представление об изменениях гранулометрического состава

шихты по ширине загрузочной воронки. Пробы отбирали 3 раза с периодичностью 1 час.

Далее вели отбор проб шихты, ссыпающейся с загрузочного лотка на агломашину. Пробы отбирали с помощью специально сконструированных пробоотборных ящичков, устанавливаемых на паллету.

Схема металлического пробоотборного ящичка показана на рисунке 2.2. Он представляет собой емкость 1 в виде правильной четырехугольной усеченной пирамиды, дном которой является меньшее основание. Такая форма облегчает извлечение пробоотборника из паллеты. Высота пробоотборника 400 мм, что соответствует высоте бортов паллеты агломашины. В одной из граней емкости предусмотрены шибера 3 высотой 130 мм каждый, которые делят пробоотборник на три отсека 2. Для извлечения пробоотборника из слоя предусмотрены захваты 4.

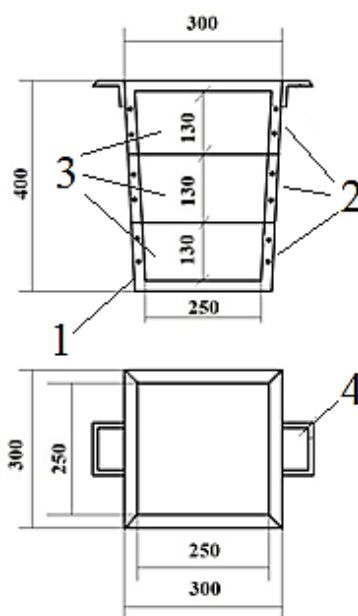


Рисунок 2.2. Схема пробоотборника агломерационной шихты:

1 – металлический ящик; 2 – отсек; 3 – шибера; 4 – ручные захваты

Исследование распределения аглошихты на паллете по гранулометрическому и химическому составам осуществляли в такой последовательности:

1. Останавливали на короткий срок агломашину.

2. На произвольно выбранную (опытную) паллету до ее прохождения под загрузочным лотком, устанавливали три пробоотборника (рисунок 2.2). Один пробоотборник размещали в осевой зоне паллеты и по одному – у ее бортов (слева и справа).

3. Включали привод агломашины.

4. После загрузки шихты на опытную паллету и в пробоотборники, расположенные в ней, агломашину останавливали. Привод агломашины переключали в реверсивный режим, и паллеты двигались в направлении головной части до момента вывода опытной паллеты из-под загрузочного лотка.

5. Пробоотборники вытаскивали из слоя вручную путем их подъема с помощью ручных захватов.

6. Порции шихты для отсева и химического анализа отбирали совком из отсеков 2 (рисунок 2.2), отодвигая поочередно шиберы 3. Таким образом удалось отобрать пробы шихты по высоте слоя на уровнях 130, 260 и 390 мм от верха.

7. Пробы массой около 10 кг ссыпали в емкости, затем готовили к химическому и ситовому анализам.

Данные ситового и химического анализов шихты из трех пробоотборников создавали представление об изменениях свойств шихты по высоте и ширине сформированного на паллете агломашины слоя.

Применялись методики отбора проб шихты по высоте слоя с помощью стального лотково-трубчатого пробоотборника, изображенного на рисунке 2.3.

Во время коротких остановок агломашины трубчатый пробоотборник вводили вручную в откос слоя под загрузочным лотком на трех уровнях, соответствующих верху, середине, низу слоя. Серии отборов проб касались осевой и периферийных частей паллет. Выполняли три серии опытов. Результаты измерений усредняли.

Для разработки рекомендаций по совершенствованию технологии загрузки в лабораторных условиях исследовали форму слоя шихты, образующегося в загрузочной воронке, при разных способах загрузки. Опыты проводили на специ-

ально сконструированной модели загрузочной воронки, схема которой приведена на рисунке 2.4.

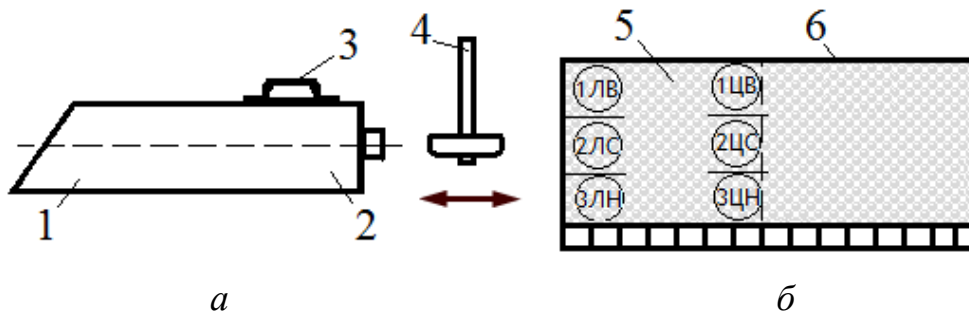


Рисунок 2.3. Схема лотково-трубчатого пробоотборника (а) и схема отбора проб шихты по высоте слоя (б) на паллете (вид паллеты спереди): 1 – пробоотборник; 2 – торцевой брус для восприятия ударов кувалдой по пробоотборнику; 3 – ручка для управления отбором проб; 4 – кувалда; 5 – слой шихты с уровнями ввода пробоотборника – верх, середина, низ левой центральной части слоя (1ЛВ, 2ЛС, 3ЛН, 1ЦВ, 2ЦВ, 3ЦН); 6 – паллета (вид спереди)

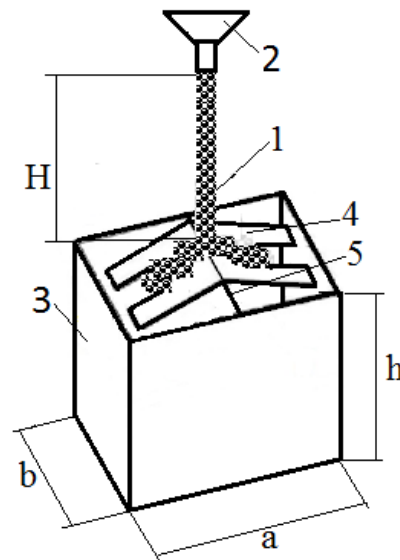


Рисунок 2.4. Схема лабораторной модели загрузочной воронки агломашины:

- 1 – поток шихты; 2 – течка; 3 – загрузочная воронка;  
4 – распределитель потока шихты; 5 – опорная ось

В качестве критерия подобия при физическом моделировании выбрано соответствие линейных размеров загрузочной воронки и ее модели. Лабораторная

установка выполнена в масштабе 1:15 согласно критерию подобия, выраженного симплексом:

$$\frac{L}{l} = 15 \quad (2.3)$$

где  $L, l$  – линейные размеры загрузочной воронки и ее модели.

Модель загрузочной воронки 3 имела размеры  $a \times b \times h = 170 \times 100 \times 170$  мм. Для выполнения симплекса (2.3) с целью имитации подготовленной к спеканию шихты использовали гранулированный материал с крупностью частиц менее 3 мм. При проведении эксперимента приняли допущение, что ввиду малых по сравнению с оригиналом размеров модели и материала, форма и масса частиц не оказывают влияние на образование поверхности слоя.

Проводили две серии экспериментов. В первую серию из точки 2 с диаметром выпускного отверстия 10 мм, установленной на высоте  $H=250$  мм от верхней кромки модели 3, сыпали материал 1 до заполнения загрузочной воронки на высоту около  $2/3$  высоты модели. Затем оценивали форму слоя, образовавшегося в воронке, измеряли и фиксировали высоту его центральной и пристеночной зон.

Вторую серию экспериментов проводили с установленным в загрузочной воронке 3 распределителем шихты 4. Его выполнили в виде двух плит, состыкованных под углом  $140-150^\circ$ , и монтировали с помощью опорной оси 5. После заполнения воронки шихтой, визуально оценивали изменение формы слоя.

### **2.3. Методика лабораторного исследования газопроницаемости слоя шихты**

В промышленных условиях оценить начальную газопроницаемость слоя шихты по ширине агломашины ввиду конструктивных особенностей спекательного отделения аглоцеха ЕМЗ затруднительно. Поэтому для исследования этой характеристики спланировали лабораторный эксперимент. Его суть состоит в определении изменения перепада давления воздуха при просасывании его через



слой лабораторной шихты, имитирующей промышленную шихту, которая уложена в осевой и прибортовой зонах паллеты.

Критерием подобия при физическом моделировании является число Рейнольдса ( $Re$ ). Для условий движения газа через слой агломерационной шихты  $Re \leq 200$  [17].

Перепад давления (мм вод.ст.) воздуха при просасывании его через слой шихты определяли на лабораторной газодинамической установке (рисунок 2.5).

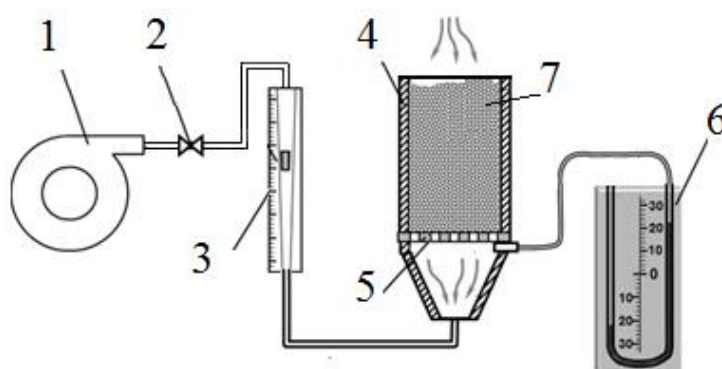


Рисунок 2.5. Схема установки для определения газодинамических свойств слоя аглошихты:

1 – эксгаустер; 2 – кран для регулирования расхода воздуха; 3 – ротаметр РС-5 для измерения расхода воздуха; 4 – стальной цилиндр для материала; 5 – решетка с отверстиями; 6 – U-образный манометр для измерения перепада давления ( $\Delta P$ ) воздуха; 7 – слой исследуемой аглошихты

Емкость, заполняемая шихтой – стальной цилиндр 4 диаметром 80 мм и высотой 270 мм с проволочной решеткой, имеющей квадратные отверстия 1 x 1 мм, в нижней части цилиндра. На решетку 5 в цилиндр 4 до его верхней кромки загружали окомкованную экспериментальную аглошихту 7. Замеряли высоту слоя  $H$ , которая практически равна высоте цилиндра. Включали эксгаустер 1 и краном 2 устанавливали минимальный расход воздуха ( $Q_{длт}$ ), при котором наблюдается на U-образном манометре 6 перепад давления ( $\Delta P$ ). По показаниям ротаметра 3 определяли количество просасываемого воздуха. Ориентируясь на показания ро-

таметра, краном 2 ступенчато изменяли расход воздуха до максимального значения, и на каждой ступени фиксировали перепад давлений. Полученные значения перепадов, для всего диапазона расходов, характеризуют газодинамические свойства шихты определенной крупности.

Объемный расход воздуха по показаниям ротаметра определяли по тарировочному графику (рисунок 2.6), который построили путем сопоставления показаний ротаметра с показаниями газового счетчика.

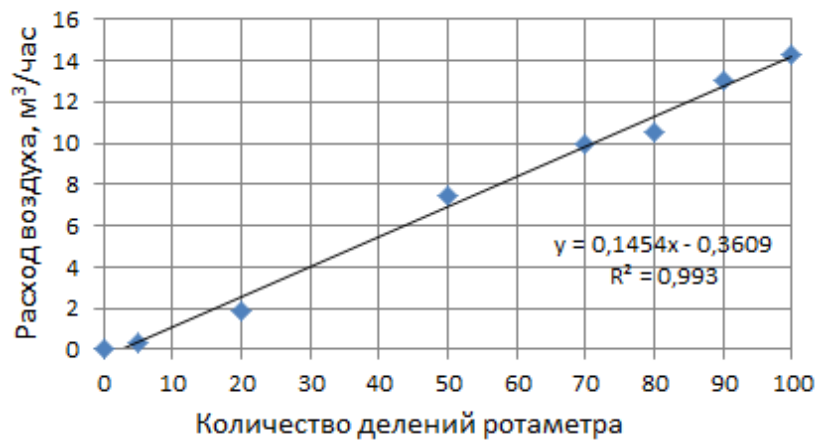


Рисунок 2.6. Тарировочный график для определения расхода воздуха

Лабораторные исследования газодинамических свойств аглошихты включали такие этапы:

1. Расчет состава шихты по данным о химическом составе компонентов и заданной основности агломерата.

Для проведения исследований приготовили лабораторную шихту весом 5,25 кг. Компонентный состав шихты приведен в таблице 2.1.

2. Установление крупности частиц компонентов, используемых для составления шихты.

Для исключения влияния пристеночного эффекта на результаты исследований приняли, что диаметр частиц слоя должен быть меньше диаметра модели в 8-10 раз [132]:

Таблица 2.1. Состав лабораторной аглошихты и крупность компонентов

Компонент	Расход в шихту		Максимальная крупность частиц шихты, мм	
	кг	%	реальной	лабораторной
Концентрат	2,33	44,40	0,074	0,074
Аглоруда	0,5	9,53	10	6
Пыль колошниковая	0,33	6,29	1	1
Возврат	1,13	21,53	5	4
Известняк	0,53	10,06	3	2
Известь	0,17	3,24	3	2
Коксик	0,26	4,95	3	2
Всего	5,248	100	-	-

$$\frac{D}{d_m} \approx 10 \quad (2.4)$$

где  $D$  – диаметр модели,  $D=80$  мм;

$d_m$  – максимальный диаметр гранул лабораторной шихты.

Следовательно, максимальный диаметр гранул лабораторной шихты должен быть не более:

$$d_m = \frac{D}{10} = \frac{80}{10} = 8 \text{ мм}$$

С учетом максимального размера гранул производственной шихты, составляющего при нормальной работе окомкователя 12-15 мм, критерий подобия гранулометрического состава производственной и лабораторной шихты можно представить симплексом:

$$\frac{d_n}{d_m} \approx \frac{15}{8} = 1,875, \quad (2.5)$$

где  $d_n$  – реальная крупность частиц подготовленной к спеканию аглошихты.

Таким образом, для выполнения критерия (2.5), максимальная крупность частиц компонентов, используемых для составления лабораторной шихты должна быть меньше крупности компонентов реальных шихт в 1,5-2 раза (таблица 2.1).

Для высеивания частиц компонентов шихты использованы сита с размерами ячеек 1, 2, 4 и 6 мм.

### 3. Дозирование компонентов шихты.

Подготовленные компоненты дозировали с помощью технических весов согласно расчету шихты на заданную основность (таблица 2.1).

### 4. Смешивание материалов и окомкование шихты.

Шихту вначале перемешивали вручную совком на противне, а после смешивали и окомковывали в тарельчатом грануляторе с диаметром чаши 0,5 м, высотой борта 85 мм, углом наклона  $55^{\circ}$  и числом оборотов в минуту  $20-60 \text{ мин}^{-1}$ .

Тарельчатый гранулятор (рисунок 2.7) использовали в качестве смешительно-окомковательного барабана для удобства визуального контроля качества окомкования и размера образующихся гранул. После смешивания материалов в течение 8 мин постепенно добавляли воду и окомковывали шихту до максимальной крупности гранул 7-8 мм. Влажность окомкованной шихты составляла 9,5-11,0%.

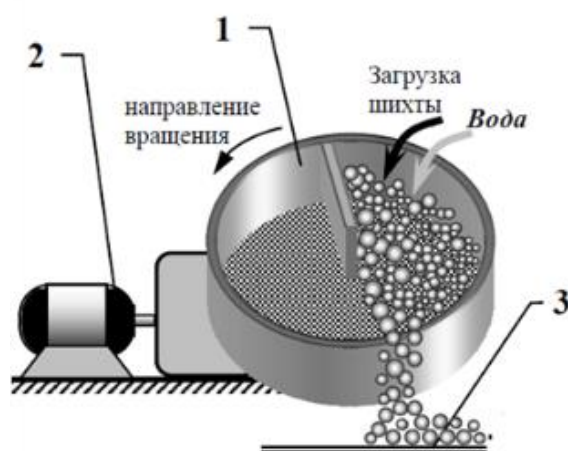


Рисунок 2.7. Окомкование шихты в тарельчатом грануляторе:

1 – тарельчатый гранулятор; 2 – электропривод; 3 – окомкованная шихта

5. Определение физических свойств окомкованной шихты: гранулометрического состава, насыпной плотности, прочности гранул на раздавливание.

6. Разделение окомкованных шихт по гранулометрическому составу.

Окомкованную шихту разделили на два класса крупности по схеме, приведенной на рисунке 2.1, с учетом критерия подобия (2.5):

- фракция менее 5 мм лабораторной шихты имитировала фракцию промышленной шихты 0-10 мм;

- фракция 5-7 мм лабораторной шихты имитировала фракцию промышленной шихты +10 мм.

7. Определение области автомодельности потока воздуха при просасывании его через слой лабораторной шихты потоку воздуха, соответствующему реальным условиям, на основе соответствия значений числа Рейнольдса ( $Re$ ).

8. Определение перепада давления воздуха при просасывании его через слой шихты.

В лабораторную установку (рисунок 2.5) загружали окомкованную шихту, включали эксгаустер, устанавливали расход воздуха, соответствующий зоне автомодельности. В ходе эксперимента определяли перепад давления воздуха при просасывании его через слой шихты. опыты повторяли для шихт крупностью 0-5 и 5-7 мм. Полученные данные обрабатывали аналитическими методами.

#### **2.4. Методика статистического анализа показателей работы агломашин**

Статистический анализ показателей работы агломерационных машин ЕМЗ проводился с целью выявления наиболее значимых факторов, оказывающих влияние на прочностные свойства агломерата по содержанию в нем фракции менее 5 мм, и разработку рекомендаций по их регулированию.

В качестве методической основы для выполнения статистического анализа использована методика обработки технико-экономических показателей работы агломерационной машины, описанная в работе [133]. Для статистического исследова-

дования использовали набор средств анализа данных (так называемый пакет анализа), входящий в состав Microsoft Excel в такой последовательности:

1. Вводили в таблицу Microsoft Excel первичные данные по работе агломерационного цеха за анализируемые периоды.

2. Анализировали дисперсии выборок на однородность по периодам с помощью процедуры Microsoft Excel «двухвыборочный F-тест для дисперсии» по критерию Фишера.

3. Определяли средние и граничные значения факторов, оказывающих влияние на содержание в агломерате фракции менее 5 мм.

4. Для получения качественного представления о влиянии технологических факторов и шихтовых условий работы на прочность агломерата строили графики парной корреляции в мастере диаграмм программы Microsoft Excel.

5. Количественную значимость влияния каждого фактора на содержание мелочи в агломерате определяли путем построения матрицы коэффициентов корреляции с помощью процедуры Microsoft Excel «Корреляция».

6. С помощью процедуры Microsoft Excel «Регрессия» рассчитывали уравнение множественной регрессии для прогнозирования показателя прочности агломерата по содержанию фракции менее 5 мм при изменении параметров процесса.

7. По критерию Фишера оценивали статистическую значимость полученной модели.

Первичные данные представлены информацией о технико-экономических показателях работы агломерационного цеха за сутки, а также данными о качестве агломерата. Информация отбиралась на основе механического способа формирования выборки единиц из генеральной совокупности [134].

Инструментом для анализа газодинамической работы агломерационной машины выбрана инженерная модель ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники» [135].

## Выводы

1. Предложена методика определения гранулометрического состава подготовленной к спеканию аглошихты, исключая существенную потерю влажности и разрушение гранул шихты в ходе отсева.

2. Разработана методика отбора проб шихты с загрузочного лотка электровибрационного питателя и с агломашины с последующим определением их химического и гранулометрического составов.

3. Предложен способ лабораторного исследования газопроницаемости слоя шихты по ширине агломерационной машины. Его суть состоит в определении на газодинамической установке изменения перепада давления воздуха при просасывании его через слой лабораторной шихты, имитирующей промышленную шихту, которая уложена в осевой и приборных зонах паллеты.

4. Предложен способ статистической оценки влияния компонентного состава шихты и технологических условий работы агломашины на содержание в агломерате фракции менее 5 мм.

Материалы раздела опубликованы в работах [136, 137].

## РАЗДЕЛ 3.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СПЕКАНИЯ ВЫСОКООФЛЮСОВАННОЙ  
ШИХТЫ В УСЛОВИЯХ АГЛОЦЕХА  
ЕНАКИЕВСКОГО МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ЗАВОДА**

**3.1. Информационно-аналитическая база для исследования  
показателей спекания высокоофлюсованных шихт**

Основными показателями процесса спекания шихт являются скорость спекания, прочность и выход годного продукта из спека, производительность агломашин, удельный расход твердого топлива на процесс спекания. Последовательный анализ влияния повышения основности шихты на указанные показатели позволяет определить резервы для их улучшения.

1. Скорость спекания высокоофлюсованной шихты увеличивается пропорционально степени ее офлюсования. Каждой 0,1 абс. ед. повышения основности соответствует увеличение скорости спекания на 4% [117].

Согласно данным приведенным в работах [74, 100, 138], повышение скорости спекания шихты является следствием увеличения скорости фильтрации газов через слой повышенной порозности, то есть газопроницаемости. Скорость движения максимума тепловой волны в нижней ступени теплообмена – от раскаленных газов к холодной шихте описывается формулой [139]:

$$u_{m.n.} = \frac{\bar{C}_Г \cdot w_Г}{\bar{C}_Г \cdot \varepsilon_{ш} + \bar{C}_{ш} \cdot (1 - \varepsilon_{ш})}, \quad (3.1)$$

где  $u_{m.n.}$  – скорость движения фронта теплопередачи – кривой температурного максимума в нижней ступени теплообмена между газом и шихтой, мм/мин;



$\bar{C}_Г$  и  $\bar{C}_{ш}$  – теплоемкость газа и кажущаяся теплоемкость шихты, Дж/(м<sup>3</sup>·°С);

$\varepsilon_{ш}$  – порозность слоя шихты, доли ед.;

$w_Г$  – скорость фильтраций газа через слой, мм/мин.

Увеличение скорости спекания высокоофлюсованной шихты обусловлено ростом скорости фильтрации газов через слой и связано с воздействием двух факторов:

- уменьшение на 100-150 °С максимальных температур в зоне горения твердого топлива (от 1290-1380 до 1190-1230°С), что способствует значительному уменьшению газодинамического сопротивления слоя и увеличению скорости фильтрации газов через слой;

- увеличение пористости аглоспека, повышение его газопроницаемости.

Таким образом, в ответ на естественное увеличение скорости спекания шихты рационально увеличивать высоту спекаемого слоя.

2. Прочность и выход годного агломерата изменяют свои значения по мере увеличения основности агломерата. У агломератов основностью 1,25-1,8 абс. ед. наблюдается снижение прочности аглоспека: увеличение выхода фракций менее 5 мм достигает 36-38%, что в определенной части соответствует наличию «классической ямы» – резкого снижения прочности агломератов в диапазонах так называемых обычных основностей [17, 74, 116].

Опыт, описанный в работах [1, 17, 117], промышленные данные аглоцефа ЕМЗ [140], свидетельствуют о том, что при увеличении основности агломерата от обычных 1,2-1,3 абс. ед. до 1,5-1,8 абс. ед. и обязательном применении высокослойного спекания не наблюдается ухудшение гранулометрического состава товарного агломерата.

На формирование минералогического состава агломерационного спека оказывают влияние основность шихты, расход топлива на процесс спекания и скорость охлаждения агломерационного расплава. Наиболее прочные кристаллические фазы структуры офлюсованного спека: гематит, магнетит, железокальциевые оливины и ферриты кальция. Быстрое охлаждение спека при малом расходе топ-

лива и высокой скорости спекания (филтрации газов) ведет к образованию аморфной фазы – хрупкого стекла из тех же оливинов, силикатов кальция и других фаз, снижающего прочность агломерата.

По мере увеличения основности при содержании в шихте более 5%  $\text{SiO}_2$ , при повышении расхода и крупности твердого топлива в структуре агломерата увеличивается содержание  $\beta$ -модификация двухкальциевого силиката  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ , склонного к полиморфному превращению в  $\gamma$ -фазу. Так как зерна двухкальциевого силиката окружены стеклом, а также кристаллическими фазами – ферритами кальция, гематитом, магнетитом, вюститом, возможности увеличения их размеров при увеличении объема двухкальциевого силиката отсутствуют, поэтому в кусках агломерата возникают огромные внутренние напряжения, разрушающие агломерат в мелкие куски или даже порошок.

Другим источником внутренних напряжений в кусках офлюсованных агломератов является различие в коэффициентах термического расширения многих фазовых составляющих агломератов определенного диапазона основности: 1,2-1,4; 1,3-1,5; 1,0-1,3 абс. ед. [74].

Выход пригодного для доменной плавки агломерата и его гранулометрический состав во всех случаях практики зависят от прочности аглоспека, степени его готовности – раздробленности перед разделением на грохотах на годный продукт и возврат, граничного размера зерна при разделении (ширины щелей сеющей решетки) и эффективности грохочения [138].

Таким образом, ухудшение прочности агломерата преодолимо за счет увеличения высоты спекаемого слоя и повышения эффективности грохочения агломерата, что позволяет считать целесообразным и возможным постепенное увеличение основности агломерата до любого, необходимого для доменной плавки уровня.

3. Удельная производительность агломерационного процесса при увеличении основности шихты имеет четкую тенденцию к некоторому росту. Только при высокой основности более 3,0 абс. ед. наблюдается уменьшение производитель-

ности вследствие резкого снижения прочности спека и уменьшения выхода годного продукта из него [117].

Известно, что производительность процесса ( $Q_{yd}$ , т/(м<sup>2</sup>·час)) зависит от четырех показателей [1, 138]:

$$Q_{yd} = 60 \cdot v_{спек} \cdot \rho_{нас} \cdot K \cdot \beta \quad (3.2)$$

где 60 – время спекания, мин;

$v_{спек}$  – вертикальная скорость спекания, м/мин;

$\rho_{нас}$  – насыпная плотность шихты, т/м<sup>3</sup>;

$K$  – выход твердого продукта из сырой шихты, доли ед. (0,85-0,87);

$\beta$  – выход годного агломерата, доли ед.

Определяющее влияние на производительность агломашин в условиях спекания высокоофлюсованной шихты оказывают скорость спекания и выход годного продукта из спека. В меньшей степени влияют на производительность насыпная масса шихты и выход твердого продукта из влажной шихты [116, 117]. Но при больших изменениях основности влияние последних показателей необходимо учитывать.

Существует экстремальная зависимость между выходом годного агломерата и производительностью агломашин [138]. Возможности выделения большего или меньшего количества мелочи в возврат, обеспечение нужных объемов производства и показателей качества выпускаемого агломерата тесно связаны между собой.

4. Удельный расход твердого топлива при производстве агломератов основностью более 2,0 абс. ед. снижается. Уменьшение потребности в топливе объясняется снижением температуры плавления шихты, в отдельных случаях – на 200-250<sup>0</sup>С [76, 116].

Приведенные обобщенные выводы из экспериментальных и промышленных спеканий высокоофлюсованных шихт, описанных в работах [1, 74, 76, 100, 116, 117, 138-140], послужили информационно-аналитической базой для проведения

дальнейших исследований влияния повышения основности шихты на технико-экономические показатели процесса и качество агломерата.

### **3.2. Анализ шихтово-технологических условий и параметров спекания высокооснованной шихты**

Агломерационный цех ЕМЗ введен в эксплуатацию в 1938 г. Последняя крупная реконструкция цеха была произведена в середине 50-х годов прошлого века. Проектная производительность аглоцеха составляет 3,0 млн.т агломерата в год. С начала 2000-х гг. производство агломерата не превышало 2,0 млн.т/год. С весны 2017 г. производство агломерата сокращено до уровня 1,0 млн.т/год и менее.

В состав цеха входят рудный двор, отделение подготовки железорудного сырья, отделение известково-коксового дробления, шихтовое отделение, спекательное отделение, отделение возврата. Спекание шихты осуществляется на четырех агломерационных машинах типа К-2-60-У площадью спекания 62,5 м<sup>2</sup> каждая. Агломашины оснащены в хвостовой части стационарными двухъярусными колосниковыми грохотами для отсева возврата. Дробилки и охладители агломерата не предусмотрены проектом.

Каждая агломашина оснащена эксгаустером типа Р-4200 с двигателем ДСП-116, 1300 кВт, параллельно подключен эксгаустер типа Р-7500 с двигателем ДАЗ-14-79, 2500 кВт. Очистка технологических газов агломашин осуществляется в батарейных мультициклонах типа ЦГ-1.

В таблице 3.1 приведены данные о показателях работы аглоцеха и качестве агломерата в 2019 г. Техничко-экономические показатели (ТЭП) определяются как технологическими возможностями оборудования, так и сырьевым обеспечением предприятия. Шихтовые условия работы с 2014 г. осложнились в связи с нерегулярными поставками аглоруды и железорудных концентратов. Поэтому для корректного анализа показателей процесса спекания высокоосновной шихты требуется подробная оценка шихтовых условий работы цеха.

Таблица 3.1. Показатели работы аглоцефа ЕМЗ в 2019 г.

Параметры и показатели	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
Объемы производства, тыс.т	52	58	89	95	90	57	63	48	35	38	59	62
Удельная производительность, т/(м <sup>2</sup> ·ч)	0,72	0,85	0,86	0,73	0,60	0,61	0,55	0,54	0,50	0,57	0,57	0,55
Разрежение, кПа	4,0	3,3	4,6	5,0	5,7	4,0	4,5	4,0	4,4	5,0	4,7	4,3
Высота слоя, мм	350	350	350	330	300	300	300	320	340	360	350	360
Скорость спекания, мм/мин	11,6	13,7	13,8	11,7	9,6	9,8	8,9	8,7	8,0	9,2	9,1	8,7
Влажность шихты, %	8,2	7,9	8,3	7,7	9,1	8,7	9,1	9,1	9,4	10,2	9,3	9,0
Содержание С <sub>гор</sub> в шихте, %	3,8	4,1	4,3	3,8	4,2	4,3	4,0	3,9	4,0	4,3	4,4	4,6
Основность, абс. ед.	1,9	1,8	2,0	1,9	1,7	1,8	1,8	2,0	2,4	3,1	3,7	4,1
Расход материалов в шихту, кг/т агломерата:												
Концентрат	483	199	437	380	553	439	558	389	417	393	493	533
Аглоруда	194	505	244	274	81	-	-	123	-	-	-	-
Вторичные ресурсы	187	294	352	351	377	725	562	592	656	568	333	285
Твердое топливо (коксик)	57	60	63	52	56	53	50	39	35	45	55	67
Известь	45	24	38	29	38	46	39	47	65	66	60	53
Известняк	72	170	103	60	23	10	2	84	101	238	345	377
Химический состав агломерата, %												
Fe	57,2	55,1	54,5	51,8	57,0	56,3	57,8	53,3	50,8	45,7	44,4	43,5
FeO	16,0	16,3	17,8	17,0	21,1	17,7	18,0	18,2	15,1	13,1	12,0	10,4
CaO	10,4	12,4	12,4	13,5	8,4	8,6	7,4	12,6	16,0	23,0	26,2	29,1
SiO <sub>2</sub>	5,6	6,8	6,1	7,0	4,9	4,8	4,0	6,3	6,6	7,3	7,0	7,2
MgO	0,9	0,9	1,5	2,2	2,2	2,6	3,2	1,6	2,4	2,4	1,6	1,5
Показатели прочности агломерата по содержанию фракций, %												
менее 5 мм	12,8	13,0	16,2	17,3	20,8	20,4	21,8	20,4	17,5	16,0	16,6	17,0
барабанные испытания:	более 5 мм	67,4	67,4	71,0	69,4	68,2	67,6	66,9	66,9	66,2	67,0	66,4
	менее 0,5 мм	4,6	4,6	4,6	4,8	5,0	4,9	4,9	5,0	5,0	5,0	5,1

Обеспечение аглоцеха ЕМЗ сырьем и компонентный состав аглошихты оценивали по данным отчетов о посуточных параметрах и о технико-экономических показателях работы цеха в период с января по декабрь 2019 г. В указанный период спеканию подвергали шихты повышенной (1,3-1,9 абс. ед.) и высокой (более 1,9 абс. ед.) основности.

В 2019 г. в производстве использованы четыре вида концентрата Лебединского, Ковдорского, Михайловского и Высокогорского ГОКов. Железорудные концентраты закладываются в штабель совместно с известьсодержащими материалами, которые представлены отсевом извести крупностью 0-10 мм и продуктами газоочисток известково-обжигового цеха. В отдельные месяцы в шихте полностью отсутствовала агломерационная руда (таблица 3.1).

Удельные расходы концентрата и аглоруды значительно ниже рекомендованных, значения которых приведены в работах [116, 117], и изменяются в недопустимо широких диапазонах, соответственно: 199-558 и 0-505 кг/т агломерата.

Дефицит сырья вынуждает вводить в шихту большое количество вторичных сырьевых материалов: шламы и пыли аглодоменного и сталеплавильного производств, отсева агломерата и др. Как видно из таблицы 3.1, удельный расход вторичных материалов составляет 187-725 кг/т агломерата (22-62%), причем в отдельные месяцы он превышает удельный расход концентрата.

Для подготовки отходов организован участок, оснащенный бульдозерами, экскаваторами и вертикальными подъемниками. Получаемаяшламоаспирационная смесь вылеживается на площадке не менее суток, а затем отдельно дозируется в аглошихту.

Для офлюсования шихты используется обычные и доломитизированные известняки Комсомольского рудоуправления и Докучаевского флюсо-доломитного комбината. Твердым топливом является коксик, образующийся в доменном цехе. Его измельчают до крупности 0-3 мм на четырехвалковых дробилках. Крупность топлива, флюсов и других компонентов аглошихты в отдельные периоды исследований показаны в таблицах 3.2 и 3.3.

Таблица 3.2. Содержание фракций 0-3 мм в известняке и топливе после дробления

Материал	Содержание фракции 0-3 мм, %		
	июнь 2019 г.	июль 2019 г.	август 2019 г.
Известняк	87,9	82,9	84,2
Коксик	82,9	87,8	90,4

Таблица 3.3. Гранулометрический состав компонентов аглошихты

Материал	Содержание фракции, %			
	0-0,5 мм	0,5-3 мм	3-5 мм	≥ 5 мм
Коксик	28,4	63,6	6,2	1,8
Известняк 0-5мм	15,1	67,4	12,2	5,3
Возврат собственный	33,6	26,7	14,8	24,9
Возврат в виде отсева агломерата из доменного цеха	34,6	44,8	6,9	13,7
Окалина	-	96,2	2,1	1,7
Шлак ККЦ	29,8	13,4	9,5	47,3

Применение в шихте повышенного количества железосодержащих отходов (ЖСО), несмотря на удешевление стоимости шихты, имеет отрицательное воздействие. Согласно промышленным исследованиям в аглоцехе ЕМЗ, описанным в работах [1, 126, 141] негативный результат увеличения расхода шлама до 400-800 кг/т проявлялся в снижении производительности на 17-39%, уменьшении прочности агломерата на 13,5-27,5% (отн.). Такое значительное ухудшение показателей процесса было вызвано нерациональной подготовкой ЖСО к использованию в аглопроизводстве.

Анализ технологии спекания высокоофлюсованных шихт с повышенным содержанием ЖСО оценивали по ТЭП работы аглоцеха ЕМЗ, обобщенным в таблице 3.1. Обращают на себя внимание невысокие показатели по скорости спекания шихты (8-10 мм/мин), разрежению в газовых коллекторах агломашин (всего лишь 3,3-4,5 кПа) и удельной производительности – 0,5-0,85 т/(м<sup>2</sup>·ч).

Произошло это в связи с резким изменением компонентного состава шихты, изменением технологии ее подготовки, ухудшением технического состояния газовых сетей агломашин, всего комплекса агломерационного оборудования, что приводило к частым простоям агломашин в связи с их текущими ремонтами. Не-

ритмичная работа агломашин сопровождается потерями стационарности процессов спекания (снижением интенсивности горения топлива и плавления шихты или их полным прекращением) и соответственно резкими снижениями показателей работы по производительности и качеству агломерата.

Достигнутые в 2019 г. показатели прочности агломерата являются вполне достаточными по требованиям технологического регламента ведения интенсивной выплавки чугуна: прочность по выходу класса более 5 мм составила 66,2-71,2%, по содержанию фракции менее 5 мм в агломерате – 12,8-17,5%, исключая периоды резкого снижения качества шихты, когда показатель по выходу фракции менее 5 мм ухудшался до 20,4-21,8% (май-август 2019 г.).

Необходимая прочность агломерата достигалась в условиях медленного просасывания воздуха через слой, когда скорость спекания снижалась более чем вдвое относительно обычных скоростей спекания.

Объяснение факту получения достаточно прочного агломерата находим при рассмотрении температурно-тепловых параметров спекания высокоофлюсованной шихты в условиях пониженных скоростей теплообмена и горения топлива:

- невысокая скорость перемещения фронта максимума тепловой волны в зоне нагрева шихты отходящими газами гармонично сближается с зоной горения твердого топлива, то есть зона высоких температур подогрева шихты не растягивается (что приводило бы к ухудшению газодинамики процесса спекания), а с момента подогрева шихты до температуры воспламенения топлива немедленно начинается стадия горения топлива и плавления шихты;

- уровень достигаемых температур в условиях медленного горения топлива оказывается достаточным для спекания высокоосновной шихты при известных пониженных температурах ее плавления (1200-1230<sup>0</sup>С); для расплавления шихты обычной основности (1,2-1,4 абс. ед.) потребовались бы температуры 1350-1380<sup>0</sup>С, то есть процесс спекания шихты оказался бы несостоявшимся;

- как показали данные исследований, приведенные в работах [76, 116, 138], снижение скорости фильтрации газов, например, в 1,8 раза (от 1,33 до 0,75 м/с) при спекании магнетитовых концентратов сопровождается увеличением макси-



мальной температуры в слое на 150-200<sup>0</sup>С, что является в рассматриваемом случае положительным фактором – восполняется возможный дефицит тепла в зоне горения-плавления шихты;

- замедленное охлаждение расплава в условиях низкой скорости просасывания воздуха способствует более полной кристаллизации его фазовых составляющих, снижению межфазных напряжений, повышению прочности товарного агломерата.

Существенным является то, что в условиях пониженной скорости спекания шихты высоту спекаемого слоя удалось удержать на достаточном, с позиций обеспечения необходимой прочности спека, уровне 300-360 мм (таблица 3.1).

Из проведенного анализа технологии получения высокоосновного агломерата становится очевидным, что уровень технологического оснащения предприятия в совокупности со сложившимися шихтовыми условиями формирует некоторые особенности процессов подготовки и спекания высокоофлюсованных шихт и требует обстоятельных исследований.

### **3.3. Оценка влияния компонентного состава шихт и основных технологических факторов на прочность высокоофлюсованного агломерата**

В практике отечественного аглопроизводства достижение заданного качества агломерата по показателю прочности приоритетно по отношению к удельной производительности агломашин. Повышенная производительность агломашин в ситуации, сложившейся на ЕМЗ, неостребована, все ресурсы полностью отданы повышению прочности агломерата. Для выявления конструктивных, технологических и иных факторов, оказывающих влияние на прочность высокоофлюсованного агломерата, проведен статистический анализ условий работы аглоцеха. Прочностные свойства агломерата оценивали по содержанию в нем фракции менее 5 мм ( $X_{0.5}, \%$ ).

Для условий аглоцеха ЕМЗ оценка влияния компонентного состава и основности шихты, технологических условий ее подготовки и спекания, которые в те-

чение 2019 г. резко изменялись (таблица 3.1), на качество агломерата может быть выполнена с помощью регрессионного анализа [17, 134].

Статистическую обработку данных о технико-экономических показателях работы цеха и качестве агломерата провели на основе посуточных отчетов о работе аглоцеха в 2019 г. по методике, описанной в подразделе 2.4. Для исследований использовали сведения о работе агломашины № 3, так как в указанном периоде она функционировала стабильно с минимальными по сравнению с другими агломашинами простоями.

Обработку данных производили по двум периодам:

1) период 1 – январь-апрель и сентябрь-декабрь (125 наблюдений), когда содержание фракции менее 5 мм в агломерате 12,8-17,5% (таблица 3.1);

2) период 2 – май-август (125 наблюдений), когда этот показатель ухудшился до 20,4-21,8%, в шихте появился труднокомкуемый Ковдорский концентрат и высота спекаемого слоя была снижена от 350 до 270 мм (таблица 3.1).

Факторами, оказывающими влияние на прочность высокоосновного агломерата согласно выводам, сформулированным в подразделе 3.1, являются:

- основность ( $B$ ), абс. ед.;
- высота слоя ( $H_{сл}$ ), мм;
- содержание топлива ( $R_{топл}$ ) в шихте, %;
- скорость спекания шихты ( $v_{спек}$ ), мм/мин.

Кроме того, влияние на прочность оказывают шихтовые условия работы и химический состав агломерата:

- содержание вторичных ресурсов ( $R_{втор}$ ) и концентрата ( $R_{конц}$ ) в железорудной части шихты, %;
- содержание Fe ( $R_{Fe}$ ) и FeO ( $R_{FeO}$ ) в агломерате, %.

Средние и граничные значения этих показателей в выборках за период 1 и 2 приведены в таблице 3.4.

Качественное представление о влиянии технологических факторов и шихтовых условий работы на прочность агломерата дают графики парной корреляции, приведенные на рисунке 3.1. Они показали следующее.

Таблица 3.4. Средние и граничные значения показателей процесса спекания

Характеристики	Период 1			Период 2			
	Минимум	Среднее	Максимум	Минимум	Среднее	Максимум	
Содержание фракции менее 5 мм в агломерате, %	9,86	15,09	20,65	15,74	20,94	25,00	
Высота слоя, мм	350	354	400	270	310	350	
Скорость спекания, мм/мин	6,08	10,95	16,24	5,04	8,50	13,86	
Содержание компонентов в железорудной части шихты, %	концентрат	7,10	42,93	75,69	10,89	43,10	68,13
	втор. ресурсы	0,00	41,16	85,44	19,80	43,10	68,13
Содержание в шихте, %	известь	0,45	4,72	10,18	2,04	3,52	5,06
	топливо	2,31	4,70	7,10	1,65	4,07	5,84
Основность, абс. ед.	1,15	2,35	3,91	0,98	1,85	2,41	
Содержание в агломерате, %	Fe <sub>общ</sub>	42,34	52,25	60,14	49,20	56,07	59,24
	FeO	9,17	15,39	26,54	12,93	18,65	24,85

1. Повышение основности шихты (рисунок 3.1 а) сопровождалось значительным снижением прочности агломерата.

2. Увеличение высоты слоя влекло явное улучшение прочности агломерата (рисунок 3.1 б).

3. Повышение расхода вторресурсов отрицательно повлияло на прочностные характеристики (рисунок 3.1, в).

4. Влияние расхода топлива на прочность агломерата (рисунок 3.1 д) указывает на разные тенденции. Но всегда на практике выявляется рациональный расход, соответствующий лучшим показателям качества агломерата (прочность, восстановимость).

5. В рассматриваемые периоды 2019 г. скорость спекания шихты снижалась до низкого для промышленных условий уровня – 5-9,8 мм/мин при средней за год – 10,3 мм/мин при разрежении 2,4 до 7,08 кПа. На рисунке 3.1 е видно пропорциональное снижение прочности агломерата при снижении скорости спекания. Но все же прочность агломерата находилась на приемлемом уровне по причинам, обоснованным ранее в подразделе 3.2.

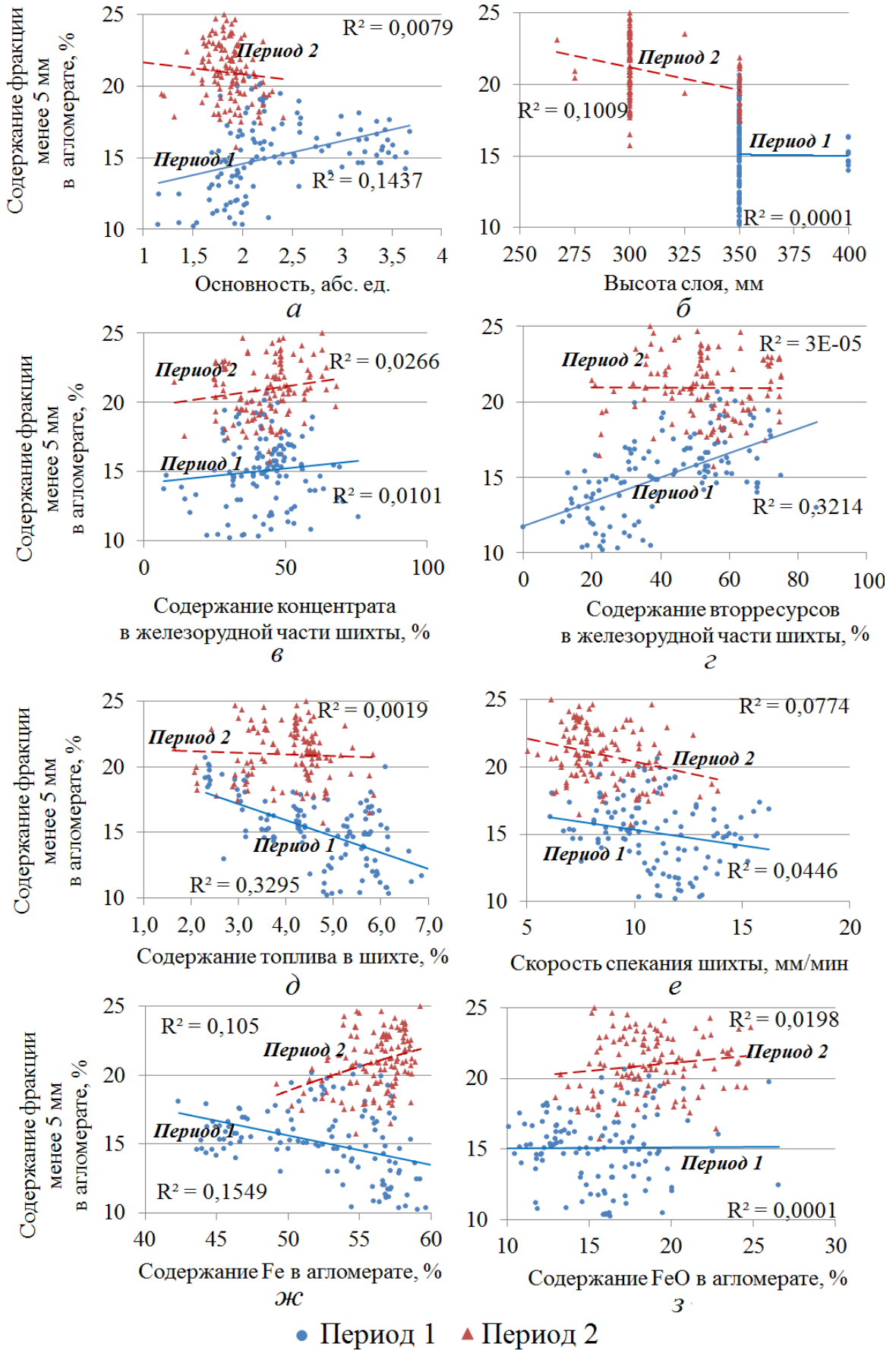


Рисунок 3.1. Влияние параметров процесса спекания на прочность высокоосновного агglomerата

6. При увеличении содержания железа и монооксида железа в агломерате наблюдается повышение его прочности (рисунок 3.1 ж и з). Объяснение этому находим при анализе теоретических положений и практических данных. Например, при увеличении содержания железа в концентрате от 62 до 69% содержание фракции менее 5 мм в агломерате снижается на 2-3% (абс.), а расход углерода топлива уменьшается на 1% (абс.) в связи с экзотермическим окислением дополнительной массы магнетита, увеличением содержания железа в концентрате на 7% [116]. Исключение составляет период 2 (рисунок 3.1 ж).

7. В обоих анализируемых периодах видна тенденция улучшения прочности агломерата при повышении содержания извести в шихте выше 2% (период 2) и 5% (период 1) (рисунок 3.2).

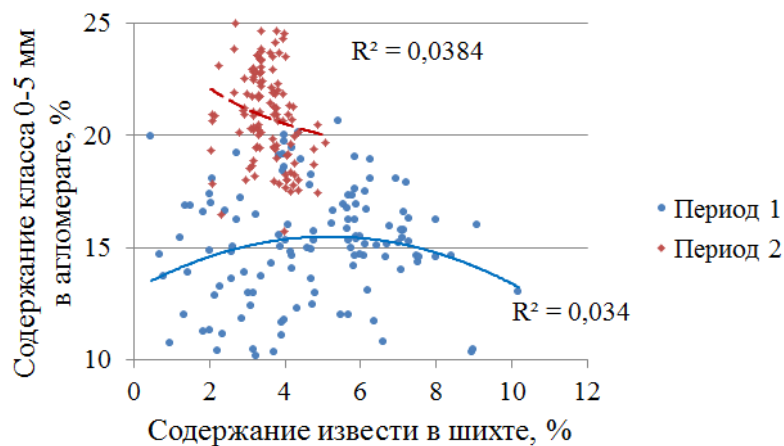


Рисунок 3.2. Влияние содержания извести на прочность агломерата

Для корректной оценки количественного вклада каждого из факторов, рассмотренных выше, в изменение прочности агломерата и для выполнения прогнозных расчетов содержания фракции менее 5 мм в агломерате при колебании компонентного состава шихты, ее основности, технологических условий работы необходимо использовать уравнения множественной регрессии.

Для численной характеристики значительности и направления связи между содержанием в агломерате фракции менее 5 мм и указанными параметрами оценили коэффициенты парной корреляции (таблица 3.5).

Таблица 3.5. Влияние технологических и шихтовых условий работы на прочность агломерата по содержанию фракции менее 5 мм

Фактор	Период 1		Период 2	
	Среднее значение	Коэффициент парной корреляции	Среднее значение	Коэффициент парной корреляции
$H_{сл}$	354	-0,01	310	<b>-0,33</b>
$v_{спек}$	10,95	<b>-0,21</b>	8,50	<b>-0,28</b>
$R_{конц}$	42,93	0,10	43,10	<b>0,16</b>
$R_{втор}$	41,16	<b>0,57</b>	52,74	-0,01
$R_{изв}$	4,72	0,05	3,52	<b>-0,24</b>
$R_{топл}$	4,70	<b>-0,56</b>	4,07	-0,04
$B$	2,35	<b>0,37</b>	1,85	-0,09
$R_{Fe}$	52,25	<b>-0,39</b>	56,07	<b>0,32</b>
$R_{FeO}$	15,39	0,01	18,65	0,14

Из таблицы 3.5 видно, что наибольшее влияние в периоде 1 на прочность агломерата оказывают факторы: содержание вторичных ресурсов и топлива в шихте, основность, содержание железа в агломерате, скорость спекания. Увеличение содержания вторичных ресурсов в шихте оказывает основное негативное влияние на прочность агломерата (коэффициент парной корреляции в данном случае наибольший и равен 0,57). Повышение содержания топлива в шихте имеет положительное влияние на прочностные свойства высокоосновного агломерата (коэффициент парной корреляции -0,56). Этот факт подтверждается графиками, приведенными на рисунке 3.1 *г* и *д*.

По коэффициентам корреляции, определенным для периода 2 видно, что между содержанием фракции менее 5 мм в агломерате содержанием в нем железа ( $R_{Fe}$ ) существует прямая линейная связь (таблица 3.5), что подтверждают также график на рисунке 3.1 *ж*. Повышение высоты слоя, скорости спекания и увеличение содержания извести в шихте оказывают положительное влияние на прочность агломерата.

Таким образом, расчет коэффициентов парной корреляции позволил выявить наиболее существенные факторы, влияющие на прочность агломерата. Однако, учитывая важность прочностных характеристик агломерата для хода домен-

ного процесса, а также для получения максимально точных результатов приняли решение при расчете уравнения множественной регрессии учитывать также и малозначимые факторы с невысокими значениями коэффициентов парной корреляции (расход концентрата в шихту, содержание Fe и FeO в агломерате).

Анализ дисперсий выборок на однородность по периодам 1 и 2 показал, что выборки нельзя объединять. Поэтому для прогнозного расчета содержания фракции менее 5 мм ( $X_{0-5}$ ) в агломерате уравнения множественной регрессии были получены для обоих периодов.

Для периода 1 уравнение принимает вид:

$$X_{0-5} = 27,2 - 0,02 \cdot H_{сл} + 0,3 \cdot \nu_{спек} + 0,09 \cdot R_{конц} + 0,09 \cdot R_{втор} - 0,33 \cdot R_{изв} - 0,80 \cdot R_{тонл} - 0,78 \cdot B - 0,20 \cdot R_{Fe} + 0,11 \cdot R_{FeO} \quad (3.3)$$

Для периода 2 уравнение после подстановки коэффициентов можно представить в виде:

$$X_{0-5} = 19,65 - 0,04 \cdot H_{сл} - 0,09 \cdot \nu_{спек} - 0,02 \cdot R_{конц} - 0,04 \cdot R_{втор} + 0,07 \cdot R_{изв} - 1,35 \cdot R_{тонл} + 0,61 \cdot B + 0,34 \cdot R_{Fe} + 0,12 \cdot R_{FeO} \quad (3.4)$$

Рассчитанное значение критерия Фишера для уравнения (3.3) составляет  $F_1=19,6$ , а для уравнения (3.4) –  $F_2=4,6$  (табличное значение критерия Фишера равно  $F_{табл}=1,83$ ). Коэффициент множественной корреляции для уравнения (3.3) составил 0,79, а для уравнения (3.4) – 0,52, что свидетельствует о достаточно высокой тесноте связи. Таким образом, полученные модели (3.3) и (3.4) являются статистически значимыми и могут быть использованы для прогнозирования показателя прочности агломерата по содержанию фракции менее 5 мм при изменении параметров процесса:

- модель (3.3) при высоте спекаемого слоя 350 мм и более;
- модель (3.4) при снижении по технологической необходимости высоты слоя до 350 мм и ниже.

Из полученных уравнений видно, что увеличение высоты спекаемого слоя шихты обеспечивает снижение содержания фракции менее 5 мм в агломерате при неизменных шихтовых условиях работы. Таким образом, одним из направлений совершенствования технологии агломерации высокоосновной шихты является разработка и внедрение способа, позволяющего регулировать (увеличивать) высоту спекаемого слоя при сохранении достаточной, рациональной скорости спекания шихты.

### **Выводы**

1. Сформулирована информационно-аналитическая база для исследования показателей производства высокоосновного агломерата в условиях аглоцеха ЕМЗ. Выявлены факторы, снижающие эффективность его работы. Приоритетные позиции в технико-экономических показателях работы аглоцеха занимает прочность агломерата.

2. Обосновано, что при аномально низких скоростях спекания шихты 8-9 мм/мин в условиях ЕМЗ содержание мелких фракций в агломерате преимущественно 2,0-5,0 абс. ед. может достигать 13,0-17,5%. Объясняется это улучшением газодинамического режима спекания, достижением в условиях замедленного горения топлива уровня температур 1200-1230 °С, достаточных для плавления высокоофлюсованной шихты. Замедление в два раза скорости фильтрации газов восполняет возможный дефицит тепла в зоне горения-плавления шихты, а при охлаждении расплава способствует более полной его кристаллизации, снижению межфазовых напряжений и в итоге уменьшению содержания в агломерате фракции менее 5 мм на 1,0-1,3% (абс.).

3. Получены эмпирические уравнения для прогнозирования параметров и показателей агломерации на основе статистической обработки данных о технико-экономических показателях работы аглоцеха.

Материалы раздела опубликованы в работах [136, 137]



## РАЗДЕЛ 4.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ СЛОЯ ВЫСОКООФЛЮСОВАННОЙ ШИХТЫ НА АГЛОМАШИНЕ

### 4.1. Исследование распределения шихты в загрузочной воронке и на агломашине

Для оценки состояния технологии загрузки шихты на агломашини ЕМЗ проведены промышленные исследования процессов формирования слоя в загрузочной воронке и на агломашине.

Последовательное рассмотрение всех стадий подготовки шихты позволяет выявить их влияние на процесс агломерации в сложившихся производственных условиях.

Первая стадия подготовки шихты к процессу спекания – складирование и усреднение шихтовых материалов – характеризуется нерациональным уровнем оснащения разгрузочно-погрузочными машинами и складскими сооружениями. Данные о химическом составе агломерата (таблица 3.1), показателях колеблемости основности и содержания железа в агломерате (таблица 4.1) свидетельствуют о невысокой эффективности усреднения сырья перегрузочными машинами.

Вторая стадия подготовки компонентов шихты – дробление известняка и твердого топлива – не соответствует рациональному уровню. Доля кондиционных фракций 0-3 мм в этих материалах составляет 83,4-85,5% вместо требуемых 95-97% (таблица 3.2).

Третья стадия – составление шихты путем весового дозирования отдельных ее компонентов – не удовлетворяет общепринятым технологическим требованиям. Применяется, в основном, объемный метод дозирования с частым контролем погонной нагрузки на сборном конвейере по каждому из дозируемых материалов.

Четвертая стадия подготовки шихты – смешивание компонентов и окомкование шихтовой смеси – обеспечивает вполне удовлетворительные показатели

однородности химического состава получаемой смеси компонентов и гранулометрического состава окомкованной шихты на фоне ситового состава отдельных компонентов (таблицы 3.3 и 4.2), поступающих в процессы смешивания и окомкования в одном барабане на каждой агломашине с размерами 2 000 x 7 000 мм, частотой вращения 5-7 мин<sup>-1</sup>.

Таблица 4.1. Показатели колеблемости содержания железа и основности агломерата в 2019 г.

Показатель	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
Колебания химического состава агломерата от средних величин:												
по содержанию Fe, %	5,0	2,5	2,4	2,4	1,6	1,3	1,1	1,8	3,2	2,2	2,9	2,4
по основности, абс. ед.	0,3	0,4	0,3	0,3	0,4	0,3	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5
Доля проб агломерата, %, соответствующих пределам колебаний от средних величин:												
по железу: (±0,5%)	17,0	17,8	11,2	5,6	26,4	27,0	33,8	17,2	10,6	18,4	14,3	14,9
(±1,0%)	43,6	34,6	24,8	15,6	49,5	58,4	64,0	38,8	24,5	38,5	28,1	30,7
по основности: ±0,05ед.)	18,3	13,0	15,8	13,0	14,2	15,7	20,6	16,6	11,7	15,1	6,9	9,9
(±0,10ед.)	34,9	22,9	34,3	24,9	25,1	32,6	40,1	39,7	27,2	29,8	13,8	16,4

Таблица 4.2. Гранулометрический состав аглошихты до и после окомкования

Номер агломашин	Место отбора пробы	Содержание фракции, %			
		0-3 мм	3-5 мм	5-10мм	≥10 мм
1	до окомкования	78,7	18,05	2,17	1,08
	после окомкования	73,29	21,66	3,25	1,8
2	до окомкования	71,48	20,58	5,78	2,16
	после окомкования	64,62	25,27	6,86	3,25
3	до окомкования	87,93	5,28	5,66	1,13
	после окомкования	58,31	19,6	15,03	7,06
4	до окомкования	72,07	12,08	11,32	4,53
	после окомкования	69,63	12,58	11,66	6,13

Данные таблицы 3.3 о гранулометрическом составе отдельных компонентов агломерационной шихты свидетельствуют о повышенном (более 45-50%) содержании в них комкующих классов крупности (более 1,6-2 мм), что позволяет оценивать способность агломерационной шихты к окомкованию, как достаточно высокую. Это подтверждается результатами исследований гранулометрического состава шихты до и после окомкования (таблица 4.2). Таким образом, можно сделать вывод о достаточных возможностях обеспечения необходимой газопроницаемости известкованной шихты в целях реализации процесса ее высокослойного спекания.

Пятая, заключительная стадия подготовки шихты к спеканию – загрузка шихты на колосниковую решетку агломашины – является одной из самых важных технологических операций, поскольку эффективное спекание шихты и получение качественного агломерата невозможны без рационального формирования слоя шихты на агломашине. Нерациональная загрузка шихты на агломашину является причиной неравномерного спекания шихты по ее ширине: слои, уложенные у бортов, спекаются быстрее, чем шихта осевой зоны, которую допекают, замедляя движение агломерационной ленты. Выпуклопараболическая форма свечения излома спека в хвостовой части агломашины (рисунок 4.1) свидетельствует о том, что в то время, как в прибортовых областях паллеты процесс спекания окончен и происходит охлаждение агломерата, в осевой области процесс горения топлива еще продолжается.

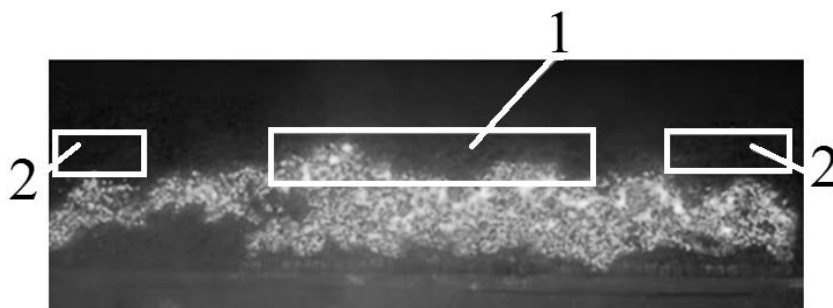


Рисунок 4.1. Фотография излома спека в хвостовой части агломашины ЕМЗ:

- 1 – зона, в которой процесс спекания продолжается,
- 2 – периферийные зоны, охлаждения готового агломерата

Загрузочное устройство (рисунок 4.2) каждой из четырех агломашин ЕМЗ состоит из загрузочной воронки (промежуточного бункера) 1, электровибрационного питателя 2, загрузочного лотка 3 и гладилки 4. Этому устройству принадлежит ряд недостатков, которые касаются формирования неравномерного по гранулометрическому составу слоя в загрузочной воронке и нерационального распределения шихты по ширине агломашины.

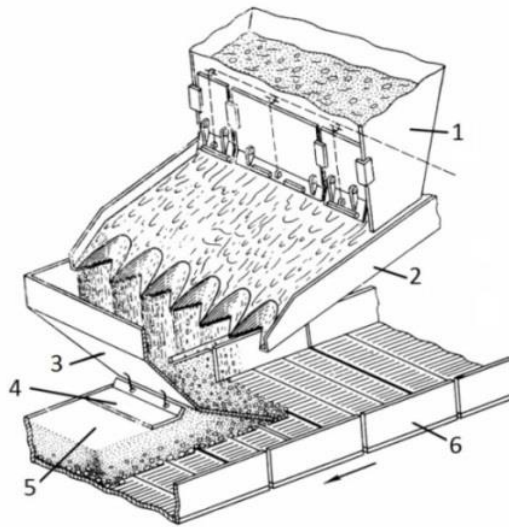


Рисунок 4.2. Схема загрузочного устройства агломашин ЕМЗ:

1 – загрузочная воронка; 2 – лоток электровибропитателя; 3 – загрузочный лоток;  
4 – гладилка; 5 – слой шихты; 6 – паллеты агломашины.

#### 4.1.1. Распределение шихты в загрузочной воронке агломашины

Загрузочная воронка 1 (рисунок 4.2) является своеобразным преобразователем узкого потока шихты, падающего из барабана-окомкователя, в широкий поток, соответствующий ширине агломерационной машины.

Загрузочная воронка представляет собой промежуточный бункер, расположенный под разгрузочным торцом барабана-окомкователя. Ее параметры: высота 2500 мм, длина 2500 мм, ширина 1500 мм, ширина разгрузочной щели 280 мм. Она оснащена датчиками высоты слоя. По технологической инструкции [78] для обеспечения равномерной загрузки агломашины неснижаемый запас готовой шихты в воронке должен составлять не менее  $2/3$  ее емкости. Высота слоя шихты

в воронке поддерживается на уровне около  $2/3$  ее высоты, что соответствует примерно 1700 мм. Выдача шихты из загрузочной воронки осуществляется электро-вибрационным питателем.

На основании показаний датчиков контроля уровня материала и визуального наблюдения графически смоделирован профиль слоя в загрузочной воронке (рисунок 4.3 *а*). Шихта 3, перегружаемая из барабана-окомкователя 1, падает с высоты 2,5 м в центральную часть загрузочной воронки 2. При соосной установке загрузочной воронки и барабана-окомкователя верхнее криволинейное очертание поверхности слоя в воронке напоминает выпуклую параболу. Угол наклона ветвей параболы соответствует динамическому углу естественного откоса материала, который для шихт, подготовленных к спеканию, составляет  $40-45^{\circ}$ . С учетом того, что барабан-окомкователь и загрузочная воронка расположены соосно, а шихта ссыпается из зоны второго нижнего квадранта барабана-окомкователя, то поток шихты попадает не в центр загрузочной воронки, а в зону, расположенную правее оси. Поэтому профиль слоя может быть несимметричным.

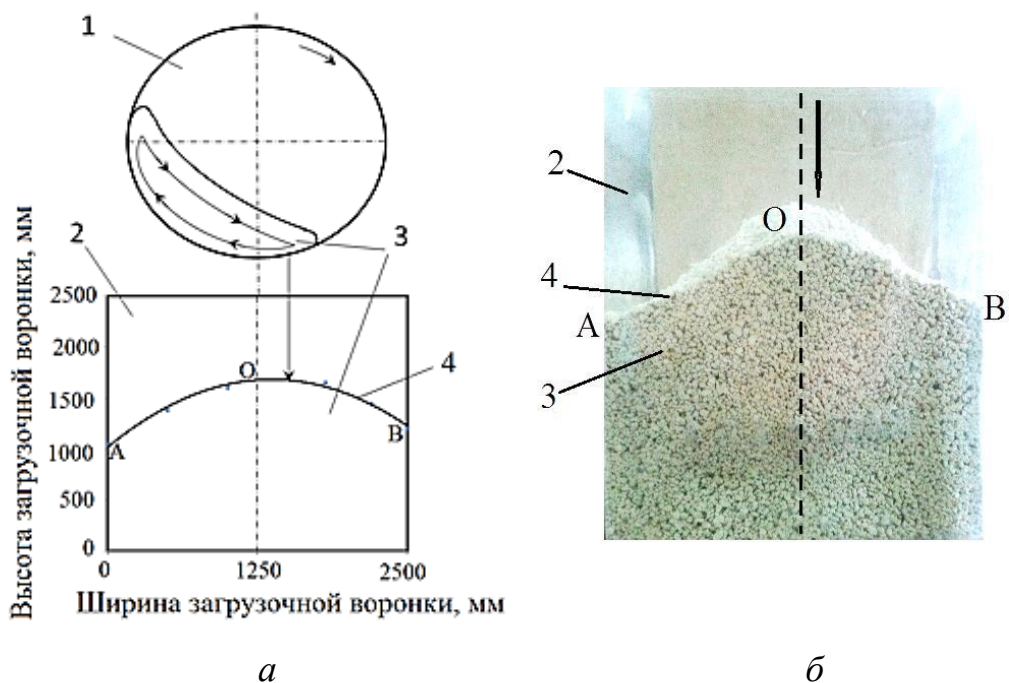


Рисунок 4.3. Профиль слоя шихты в бесчелноковой загрузочной воронке:

*а* – графическая модель, *б* – физическая модель

1 – барабан-окомкователь; 2 – загрузочная воронка; 3 – шихта; 4 – конус загрузки

В ходе лабораторных исследований, проведенных по методике, описанной в подразделе 2.2, также подтверждено, что поверхность конуса загрузки имеет форму, напоминающую выпуклую параболу (рисунок 4.3 б).

Негативное воздействие на формирование слоя в загрузочной воронке дополнительно оказывают следующие факторы:

1. Ввиду отсутствия в загрузочной воронке распределителя шихты, поток, сыпавшийся из барабана-окомкователя, постоянно направлен в центральную зону. С повышением основности шихты в ней возрастает доля мелких фракций известняка, которые при ссыпании с барабана-окомкователя остаются в центре загрузочной воронки, на них оказывает уплотняющее воздействие падающий достаточно тяжелый поток шихты.

2. Массивные налипания шихты на стенки загрузочной воронки приводят к уменьшению ее объема, неблагоприятному распределению шихты, нарушению, в дальнейшем, сегрегационных процессов. При обрушении налипаний крупные комья шихты попадают на паллеты (рисунок 4.4), не спекаются и удаляются из спека в виде возврата.



Рисунок 4.4. Загрузка шихты на агломашину ЕМЗ

Для оценки влияния распределения шихты в загрузочной воронке на формирование гранулометрического состава шихты на агломашине проведены про-

мышленные исследования по методике, описанной в подразделе 2.2, для условий спекания шихт основностью 2,5 и 3,5 абс. ед. По результатам эксперимента определены гранулометрический состав (таблица 4.3) и эквивалентный диаметр частиц шихты (рисунок 4.5) в осевой и периферийной зонах по ширине загрузочной воронки.

Эквивалентный диаметр гранул шихты ( $d_{э\text{кв}}$ ) рассчитывали по формуле, рекомендованной в справочнике [142]:

$$d_{э\text{кв}} = \frac{\sum_{i=1}^n g_i}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{d_i}}, \quad (4.1)$$

где  $g_i$  — массовая доля отдельных фракций, %;

$d_i$  — среднеарифметическая крупность соответствующих фракций, мм;

$n$  — общее число фракций.

Таблица 4.3. Гранулометрический состав шихт, отобранных по ширине лотка вибрационного питателя агломашин ЕМЗ при разных шихтовых условиях

№ АМ	Место отбора проб на лотке вибропитателя	Гранулометрический состав, %				$d_{э\text{кв}}$ , мм
		- 3 мм	3-5 мм	5-10 мм	+ 10 мм	
Основность шихты В=2,5 абс. ед.						
1	Левая сторона	25	16	38	22	3,72
	Центр	52	13	24	11	2,38
	Правая сторона	31	17	33	20	3,30
Основность шихты В=3,5 абс. ед.						
3	Левая сторона	40	9	30	21	2,91
	Центр	65	11	17	7	2,05
	Правая сторона	51	11	25	13	2,44

Из таблицы 4.3 видно, что содержание фракций более 5 мм у стенок загрузочной воронки на 55-60% (отн.) выше, чем в ее осевой части. Анализ полученной информации показывает, что крупные гранулы по ветвям «параболы» сегрегиру-

ют преимущественно к боковым стенкам загрузочной воронки (рисунок 4.5). Причем при несимметричном расположении конуса загрузки 4 в воронке 2 (рисунок 4.3 *a*) по более длинной его образующей ОА сегрегируют бóльшие массы крупной шихты, чем по более короткой образующей ОВ.

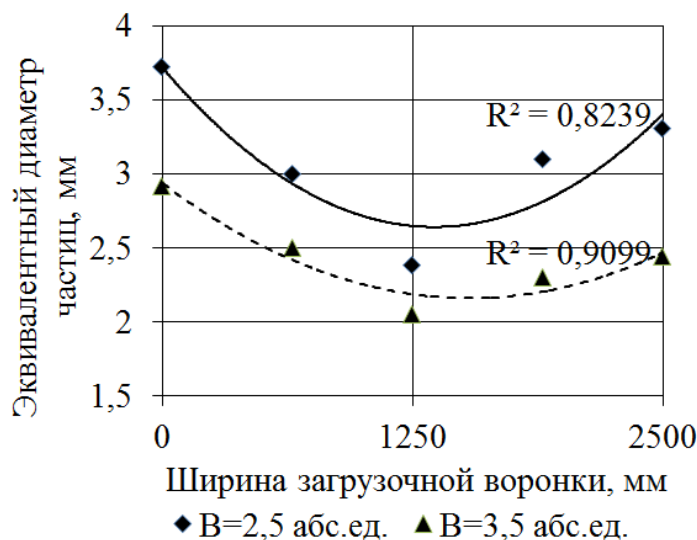


Рисунок 4.5. Изменение гранулометрического состава шихт основностью 2,5 и 3,5 абс. ед. по ширине загрузочной воронки

Опытно-промышленные исследования доказали результаты более ранних лабораторных исследований [117] фракционного состава шихт разной основности: с повышением основности шихты ее гранулометрический состав изменяется. Он становится менее благоприятным для спекания по сравнению с шихтой низкой (до 1,0 абс. ед.) и обычной (1,0-1,3 абс. ед.) основности. Для высокоофлюсованной шихты характерна повышенная массовая доля известняка в шихте, а значит преобладание массовой доли мелких фракций над долей крупных, что ведет к снижению порозности.

Как известно [1, 26], газодинамическое сопротивление слоя сыпучих материалов при прохождении через него воздуха связано с размером частиц ( $d_{эkv}$ ) обратно пропорциональной зависимостью по формуле Дарси-Вейсбаха (формула 1.3). Изменение эквивалентного диаметра частиц шихты по ширине загрузочной воронки отражает изменение газодинамического сопротивления слоя по ее ши-



рине. Таким образом, расчетное изменение газодинамического сопротивления слоя шихты высотой 350 мм по ширине воронки представляет собой подобие выпуклой параболы, обратной графику, приведенному на рисунке 4.5: в центральной части загрузочной воронки формируется слой шихты повышенного газодинамического сопротивления, в пристеночных зонах газодинамическое сопротивление слоя ниже.

Следует подчеркнуть, что проблема нерациональной укладки шихты в загрузочной воронке также актуальна для современных машин, оборудованных челноковыми распределителями шихты [17, 24].

Исходя из вышеизложенного следует необходимость дальнейшего изучения влияния сегрегационных процессов в загрузочной воронке на свойства шихты по высоте и ширине слоя на агломашине.

#### **4.1.2. Исследование параметров укладки слоя высокоофлюсованной шихты на агломашине**

Из загрузочной воронки 1 (рисунок 4.2) шихта под действием вибраций электровибрационного питателя перегружается параллельными потоками через разгрузочную щель на плоскость лотка 2 электровибропитателя, затем следует на загрузочный лоток 3 агломашины, установленный под углом к горизонту, близким к углу естественного откоса шихты ( $40-45^{\circ}$ ) и далее на колосниковую решетку паллет 6. На агломашинах ЕМЗ этот угол увеличивают до  $50-52^{\circ}$  с целью уменьшения налипаний влажной шихты на плоскость загрузочного лотка.

Электровибрационный питатель, входящий в конструкцию загрузочного узла, ликвидирует дискретность потока и обеспечивает загрузку шихты на лоток тонким слоем. Но для его надежной работы требуется шихта стабильной и ограниченной влажности [74].

В ходе эксплуатации электровибрационного питателя проявляются следующие недостатки:

1. Затраты электроэнергии при его использовании вдвое выше, чем в случае применения барабанного питателя.

2. Влажная шихта налипает на лоток, что вызывает сегрегацию гранул в боковые стороны. Налипания вынуждают менять частоту вибраций электромагнитного вибропривода.

3. Налипшая на разгрузочном конце лотка вибропитателя уплотненная влажная шихта периодически скалывается, и в виде порций падает на загрузочный лоток, а затем на аглоленту (рисунок 4.4). Это ведет к нарушению процессов выделения естественной постели и ухудшению показателей процесса спекания.

4. Высокая запыленность воздуха является причиной попадания агломерационной пыли в зазоры пластинчатого электромагнита, что снижает производительности устройства.

Кроме того электровибропитатель ограничивает обзор агломератчиком потока шихты и слоя, загружаемого на паллеты, усложняет контроль ориентировочной влажности, качества окомкования шихты, а также степени ее сегрегации, полноту загрузки заданной высоты слоя шихты на паллеты.

Для оценки формирования слоя на агломашинах проведены промышленные исследования гранулометрического и химического составов шихт основностью 2,5 абс. ед. и 3,5 абс. ед. по высоте и ширине слоя по методикам, описанным в подразделах 2.1 и 2.2.

В ходе изучения распределения шихты основностью 2,5 абс. ед. на паллете установлено, что гранулы крупностью +5 мм сегрегируют в прибортовую зону паллеты (таблица 4.4). Шихта крупностью менее 3 мм сосредоточена, преимущественно, в центральной части слоя. Гранулы крупностью 3-5 мм распределены по ширине слоя относительно равномерно.

Таблица 4.4. Фракционный состав шихты основностью 2,5 абс. ед.  
по ширине паллеты (высота слоя 300 мм)

Место отбора проб	Содержание фракций, %				d <sub>ЭКВ</sub> , мм
	-3	3-5	5-10	+10	
Левый борт	56	18	8	18	2,25
Центр	66	16	9	11	2,00
Правый борт	44	18	14	24	2,62
Среднее	55	17	11	17	2,26

Данные исследований гранулометрического состава шихты основностью 3,5 абс. ед. по высоте и ширине паллеты приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5. Данные по послойному исследованию гранулометрического состава шихты основностью 3,5 абс. ед. на паллете

Место отбора пробы	Содержание фракции, %				d <sub>экв</sub> , мм
	- 3 мм	3-5 мм	5-10 мм	+ 10 мм	
Левый борт паллеты					
верх	48	10	28	14	2,57
середина	39	9	30	22	2,96
низ	33	7	32	28	3,36
Среднее	40	8	30	22	2,93
Центр паллеты					
верх	69	11	16	4	1,95
середина	65	11	18	6	2,05
низ	62	12	18	8	2,12
Среднее	65	11	17	7	2,04
Правый борт паллеты					
верх	55	10	24	11	2,33
середина	50	12	26	12	2,48
низ	47	12	27	14	2,59
Среднее	50	11	26	13	2,46

Из таблицы 4.5 следует, что шихта основностью 3,5 абс. ед. окомкована равномерно в гранулы крупностью 2-3 мм. Фракционный состав шихты верхней части слоя прибортовой и центральной зон характеризуется преобладанием таких частиц. Гранулы крупностью +5 мм сегрегируют, главным образом, к бортам паллеты и сосредоточены в нижней части слоя. В прибортовых зонах паллет содержание в шихте фракции 0-3 мм различно и на 15-20% ниже, чем центральной зоне.

Информация об изменении насыпной плотности шихты основностью 3,5 абс. ед. и ее химического состава приведена в таблице 4.6. Эти сведения являются актуальными для аглоцеха ЕМЗ, поскольку в шихте присутствуют в значительных количествах некондиционные классы крупности топлива и известняка более 3 мм (таблица 3.2).

Таблица 4.6. Химический состав и насыпная плотность аглошихты основностью 3,5 абс. ед. по высоте и ширине паллеты

Место отбора пробы	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Химический состав аглошихты, %					
		SiO <sub>2</sub>	Fe	FeO	CaO	C	ППП
Правый борт паллеты							
верх	1600	5,12	45,03	13,75	18,02	4,64	12,99
середина	1750	4,85	43,35	13,65	17,71	4,51	13,18
низ	1630	5,36	44,03	13,65	17,05	4,34	11,43
Среднее	1660	5,11	44,14	13,68	17,59	4,50	12,53
Центр паллеты							
верх	1700	4,77	40,78	12,66	22,45	4,85	14,76
середина	1790	4,82	39,14	12,25	20,40	4,63	14,93
низ	1690	5,00	41,85	13,34	19,48	4,53	14,46
Среднее	1730	4,86	40,59	12,75	20,78	4,67	14,72
Левый борт паллеты							
верх	1620	5,24	41,39	12,94	18,72	5,01	14,44
середина	1780	5,20	39,89	12,56	19,66	4,98	14,89
низ слоя	1650	4,62	41,96	13,38	19,58	4,59	14,33
Среднее	1680	5,02	41,08	12,96	19,32	4,86	14,55

Насыпная плотность шихты, уложенной в прибортовых зонах паллеты ниже на 5-6%, чем шихты в центральной части (таблица 4.6).

Химический состав шихты по ширине паллеты неоднородный, например, колебания содержания железа по высоте и ширине слоя достигают 10%. Разница между содержанием углерода в шихте прибортовых и центральной зоны составляет 0,2-0,35% (абс.) (таблица 4.6, рисунок 4.6). Следовательно, в прибортовой слой шихты тепла от горения топлива вносится меньше, чем в слой центральной зоны. Это, наряду с ускоренной фильтрацией воздуха, обусловленной большей порозностью слоя в прибортовой зоне, а также пристеночным эффектом и прибортовыми прососами ведет к повышению скорости спекания шихты в этой зоне.

В работах [143, 144] отмечена опасность самопроизвольного разрушения офлюсованных агломератов при появления β-модификации 2CaO·SiO<sub>2</sub>.

Изменение эквивалентного диаметра частиц шихт основностью 2,5 и 3,5 абс. ед. по ширине агломашины (рисунок 4.7) полностью согласуется с данными, показанными на рисунке 4.5, который отражает распределение шихты по

крупности по ширине загрузочной воронки. Таким образом, экспериментально установлено, что структура слоя, образовавшегося в загрузочной воронке, синхронно переносится на агломашину – соотношение классов крупности по ширине слоя на агломашине качественно не меняется.

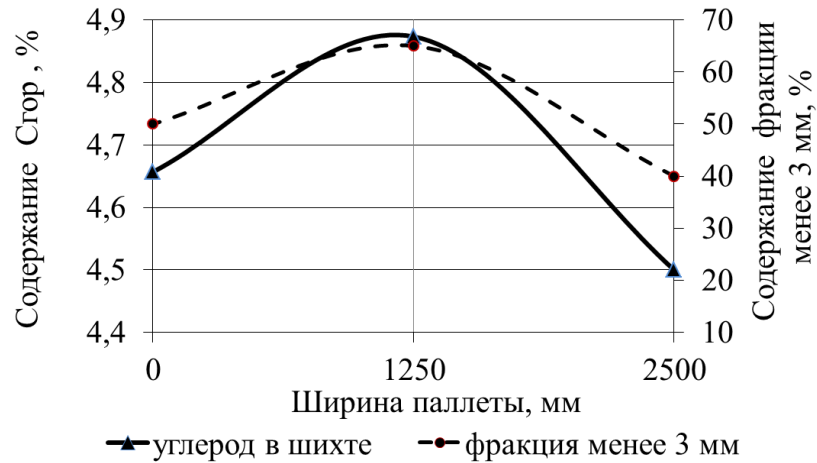


Рисунок 4.6. Распределение фракции менее 3 мм и горючего углерода в шихте по ширине агломашины

Крупность шихты от верх к низу слоя увеличивается почти линейно (рисунок 4.8). Крупные фракции сегрегируют в нижнюю часть слоя, но процесс формирования слоя естественной постели является несовершенным из-за существенных изменений влажности шихты, недостаточного наличия в шихте крупных фракций, обрушения налипаний влажной шихты на поверхности загрузочных устройств и др.

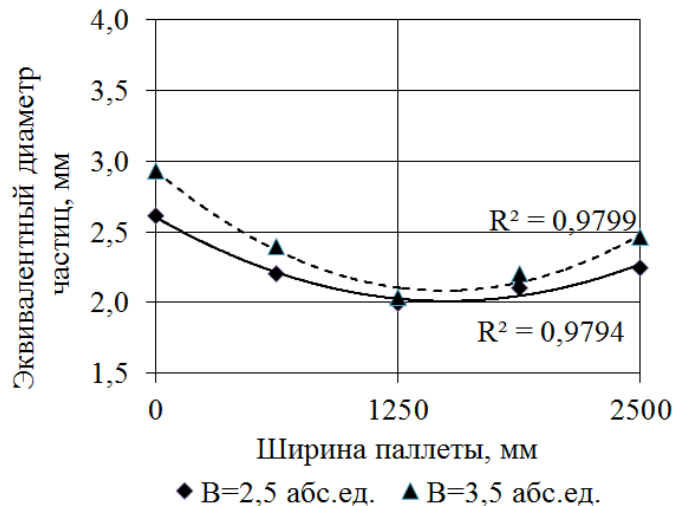


Рисунок 4.7. Распределение шихты по крупности по ширине паллеты



Рисунок 4.8. Распределение шихты по крупности по высоте слоя

#### 4.2. Исследование влияния способа загрузки высокоофлюсованной шихты на газопроницаемость слоя на агломашине методом физического моделирования

Начальная газопроницаемость шихты, расположенной в осевой и прибортовых зонах паллет, различна. Это обусловлено выраженной неоднородностью ее гранулометрического состава. В данном случае под начальной газопроницаемостью подразумевается газопроницаемость слоя, уложенного на агломашину, до начала процесса спекания. Для количественной оценки такой разницы был спланирован и проведен эксперимент по методике, описанной в подразделе 2.3.

Газопроницаемость слоя аглошихты характеризует величина удельного газодинамического сопротивления слоя [17, 145]:

$$C = \frac{\Delta P}{H_{сл}} \quad (4.2)$$

где  $C$  – газопроницаемость аглошихты, Па/м;

$\Delta P$  – перепад давления воздуха при просасывании его через слой агломерационной шихты, Па;

$H_{сл}$  – высота слоя шихты, м.

Количественные характеристики газопроницаемости – перепад давлений ( $\Delta P$ ) и сопротивление движению газа через слой полидисперсных агломерационных шихт, изучены во многих исследованиях [26, 33, 85, 145, 146].

Для аналитической оценки газопроницаемости шихты по экспериментальным данным удобно использовать формулу Л.К. Рамзина [17]:

$$\Delta P = A \cdot H_{сл} \cdot w_0^n \quad (4.3)$$

где  $A$  – коэффициент газодинамического сопротивления слоя;

$w_0$  – скорость газа на входе в слой, м/с;

$n$  – эмпирический коэффициент, характеризующий режим течения газа: при ламинарном режиме  $n=1$ , при турбулентном  $n=2$ , при переходном  $1 < n < 2$ .

Скорость газа  $w_0$  определяют по формуле:

$$w_0 = \frac{Q}{F \cdot 3600}, \text{ м/с} \quad (4.4)$$

где  $Q$  – расход газа, м<sup>3</sup>/час;

$F$  – площадь просасывания, м<sup>2</sup>.

В работе [17] значение коэффициента  $n$  для агломерационной шихты рекомендовано принимать на уровне 1,6. Значение коэффициента  $A$  ориентировочно можно определить по формуле, предложенной в работе [146]:

$$A = \rho_{нас} \cdot \left( \frac{H_{сл}}{d_{эКв}} \right)^{0,37} \quad (4.5)$$

где  $\rho_{нас}$  – насыпная плотность шихты, кг/м<sup>3</sup>;

$d_{эКв}$  – эквивалентный диаметр частиц шихты, мм, по формуле (4.1).

При лабораторном исследовании газопроницаемости слоя определяли перепад давления воздуха при просасывании его через слой модельной шихты, имитирующей промышленную шихту, уложенную у бортов и в осевой зоне паллет. Для адаптации результатов эксперимента к реальным условиям распределения шихты по крупности по ширине агломашины использовали формулы:

$$\Delta P_{\text{борт}} = \Delta P_{0-5} \cdot B_{-10}^{\text{борт}} + \Delta P_{5-7} \cdot B_{+10}^{\text{борт}} \quad (4.6)$$

$$\Delta P_{\text{центр}} = \Delta P_{0-5} \cdot B_{-10}^{\text{центр}} + \Delta P_{5-7} \cdot B_{+10}^{\text{центр}} \quad (4.7)$$

где  $\Delta P_{\text{борт}}$  и  $\Delta P_{\text{центр}}$  – перепад давления воздуха в слое шихты, расположенной в прибортовых и осевой зонах паллет соответственно, Па;

$\Delta P_{0-5}$  и  $\Delta P_{5-7}$  – перепад давления воздуха в слое экспериментальных шихт крупностью 0-5 и 5-7 мм, определенный на лабораторной установке; согласно критерию подобия, описанному формулой 2.5 в подразделе 2.3, указанные фракции шихты соответствуют фракциям -10 мм и +10 мм промышленной шихты;

$B_{-10}$  и  $B_{+10}$  – содержание фракций -10 мм и +10 мм в промышленной шихте, в долях единицы.

Значения  $B_{-10}$  и  $B_{+10}$  приняли по данным промышленных исследований гранулометрического состава аглошихт по ширине паллеты, результаты которых приведены в таблицах 4.4 и 4.5. Для определения показателей моделирования необходимая информация обобщена в таблице 4.7.

Перед осуществлением эксперимента на модели, загруженной лабораторной аглошихтой крупностью 1-7 мм, провели постановочные опыты с целью определения области автомодельности, для которой соблюдается соответствие значения критерия Рейнольдса ( $Re$ ) промышленным условиям. Результаты постановочных опытов и рассчитанные критерии  $Re$  приведены в таблице 4.8.



Таблица 4.7. Гранулометрический состав и насыпная плотность аглошихты, принятые для моделирования по производственным данным

Основность шихты, абс. ед.	Место отбора проб на паллете	Содержание фракции, % (производственные данные)		$d_{\text{экв}}$ , м	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>
		- 10 мм (0-5 мм) <sup>*)</sup>	+ 10 мм (5-7 мм)		
2,5	левый борт	82	18	0,0029	1650
	центр	89	11	0,0027	1760
	правый борт	76	24	0,0028	1650
3,5	левый борт	78	22	0,0028	1700
	центр	93	7	0,0026	1800
	правый борт	87	13	0,0027	1700

<sup>\*)</sup> – в скобках приведены фракции лабораторной шихты, принятые для имитации реального гранулометрического состава аглошихты

Таблица 4.8. Результаты постановочных опытов на газодинамической модели

Параметры модели					Критерий Re
Расход воздуха, подаваемого в модель		Расчетная скорость воздуха в модели на пустое сечение, м/с	Перепад давления воздуха на высоту слоя шихты		
количество делений ротаметра	м <sup>3</sup> /час		мм вод.ст	Па	
55	7,64	0,42	70	687	135
58	8,07	0,45	70	687	142
65	9,09	0,50	71	696	160
78	10,98	0,61	72	706	194
82	11,56	0,64	72	706	204
83	11,71	0,65	71	696	207
90	12,73	0,70	78	765	225
100	14,18	0,78	83	814	250

Скорость воздуха в модели на пустое сечение определяли по формуле (4.4), число Re – по формуле:

$$Re = \frac{w_0 \cdot \rho \cdot d_{\text{экв}}}{\eta} = \frac{w_0 \cdot d_{\text{экв}}}{\nu} \quad (4.8)$$

где  $\rho$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;

$\eta$  – динамический коэффициент вязкости газа, кг/(м·с);

$\nu$  – кинематический коэффициент вязкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Критерием подобия газодинамической модели реальным условиям является соответствие чисел Рейнольдса ( $Re$ ) условию  $Re \leq 200$  [17].

Из таблицы 4.8 видно, что при значении расхода воздуха  $Q_{\text{воз}} \approx 11,56 \text{ м}^3/\text{час}$  величина критерия  $Re = 204$ . Поэтому для выполнения условия подобия приняли, что расход воздуха в модели должен быть в диапазоне  $7,6-11,5 \text{ м}^3/\text{ч}$  (от 55 до 80 делений ротаметра).

После проведения постановочных опытов исследовали газодинамические свойства лабораторных шихт. При этом приняли следующее допущение. На газопроницаемость слоя шихты по ширине паллеты влияет гранулометрический состав и распределение фракций шихты в осевой и прибортовых зонах. Согласно промышленным данным по рассеву шихт с паллеты (таблицы 4.4 и 4.5), анализируемые шихты основностью 2,5 и 3,5 абс. ед. различаются по указанным показателям. Поэтому адаптацию результатов, полученных в ходе лабораторного эксперимента, к реальным условиям загрузки шихт различных основностей, проводили, учитывая соотношение фракций  $-10 \text{ мм}$  и  $+10 \text{ мм}$  в прибортовых и осевой зонах паллеты. При этом абстрагировались от влияния химического состава шихты на процессы формирования слоя на паллетах.

Первичные данные эксперимента приведены в таблице 4.9. Из них для дальнейшей обработки выбрали результаты определения перепада давления воздуха при просасывании его через слой, полученные при расходе воздуха 8,4; 9,8; 11,3  $\text{м}^3/\text{час}$ , что соответствует 60, 70, 80 делениям ротаметра соответственно (таблица 4.10).

Конечные результаты определения газодинамических свойств шихты по ширине паллеты по результатам лабораторного эксперимента и по формулам (4.6) и (4.7) представлены в таблице 4.11 и на графике на рисунке 4.9.

На графике (рисунок 4.9) видно, что кривая газодинамического сопротивления слоя применяемой высоты напоминает выпуклую параболу, растянутую по ширине агломашины. Независимо от расхода воздуха перепад давления воздуха в слое аглошихты, расположенной в прибортовых зонах, на 12-15% ниже перепада

давления в слое шихты осевой зоны паллеты. Причем для шихты основностью 3,5 абс. ед. разница перепада давлений по ширине агломашины меньше, чем для шихты основностью 2,5 абс. ед.

Таблица 4.9. Первичные результаты эксперимента по определению газодинамических свойств лабораторной аглошихты фракций 0-5 и 5-7 мм

Расход воздуха, подаваемого в модель		Скорость воздуха в модели на пустое сечение, м/с	Перепад давления газа на высоту слоя шихты	
число делений	м <sup>3</sup> /час		мм вод.ст	Па
Шихта крупностью 0-5 мм				
52	7,20	0,40	110	1079
<b>60</b>	<b>8,36</b>	<b>0,46</b>	<b>130</b>	<b>1275</b>
<b>70</b>	<b>9,82</b>	<b>0,54</b>	<b>148</b>	<b>1451</b>
72	10,11	0,56	156	1530
<b>80</b>	<b>11,27</b>	<b>0,62</b>	<b>168</b>	<b>1648</b>
85	12,00	0,66	174	1706
90	12,73	0,70	188	1844
95	13,45	0,74	216	2118
100	14,18	0,78	218	2138
Шихта крупностью 5-7 мм				
54	7,49	0,41	20	196
55	7,64	0,42	22	216
<b>60</b>	<b>8,36</b>	<b>0,46</b>	<b>24</b>	<b>235</b>
<b>70</b>	<b>9,82</b>	<b>0,54</b>	<b>30</b>	<b>294</b>
75	10,54	0,58	36	353
76	10,69	0,59	38	373
77	10,84	0,60	38	373
<b>80</b>	<b>11,27</b>	<b>0,62</b>	<b>42</b>	<b>412</b>
85	12,00	0,66	44	431
90	12,73	0,70	48	471
95	13,45	0,74	58	569
100	14,18	0,78	62	608

Таблица 4.10. Газодинамические свойства лабораторной аглошихты (высота слоя 270 мм)

Фракции лабораторной шихты	Перепад давления воздуха ( $\Delta P$ , Па) при различном расходе воздуха ( $Q_{\text{воз}}$ )			
	$Q_{\text{воз}}$ , м <sup>3</sup> /час	8,4	9,8	11,3
0-5		1275	1451	1648
5-7		235	294	412

Таблица 4.11. Данные лабораторных исследований газопроницаемости слоя шихты по ширине агломашины (высота слоя 270 мм)

Зона на паллете	Параметры воздушного потока	Газодинамические свойства аглошихты						Среднее <sup>*)</sup>
		$\Delta P$ , Па	$C$ , Па/м	$\Delta P$ , Па	$C$ , Па/м	$\Delta P$ , Па	$C$ , Па/м	
	$Q$ , м <sup>3</sup> /час	8,4		9,8		11,3		
	$w_0$ , м/с (расчетная)	0,46		0,54		0,62		
Шихта основностью 2,5 абс. ед.								
Левый борт		1020	3778	1140	4222	1330	4952	$\frac{1163}{4320}$
Центр		1160	4298	1324	4904	1511	5598	$\frac{1332}{4933}$
Правый борт		1035	3836	1185	4389	1363	5049	$\frac{1194}{4424}$
Разница абс., Па		133	491	162	599	165	598	$\frac{153}{422}$
Разница отн., %		13		14		15		11,5
Шихта основностью 3,5 абс. ед.								
Левый борт		1098	4067	1255	4647	1437	5324	$\frac{1263}{4679}$
Центр		1212	4491	1382	5118	1573	5827	$\frac{1389}{5145}$
Правый борт		1120	4148	1324	4904	1505	5574	$\frac{1316}{4875}$
Разница абс., Па		103	384	93	343	102	378	$\frac{99}{368}$
Разница отн., %		11		12		12		7,2

<sup>\*)</sup> в числителе приведено значение  $\Delta P$ , в знаменателе –  $C$  (по формуле 4.2).

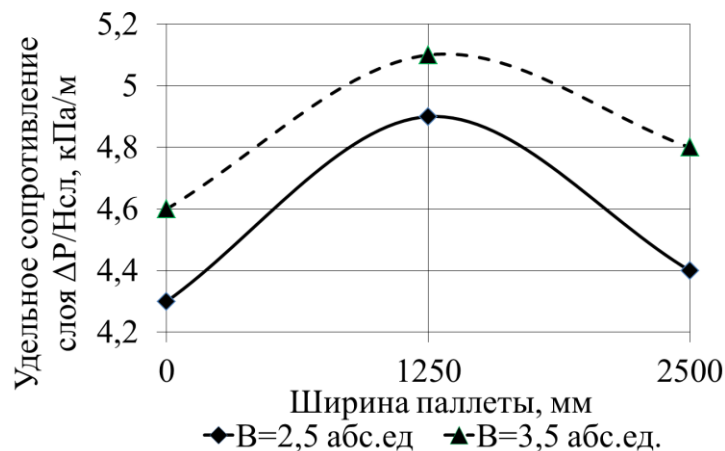


Рисунок 4.9. Удельное газодинамическое сопротивление слоя шихт основностью 2,5 и 3,5 абс. ед. по ширине паллеты (по результатам лабораторного эксперимента)

Для сравнения экспериментальных данных перепада давления в слое аглошихты с расчетными использовали формулы (4.3) и (4.5). После подстановки выражения (4.5) в зависимость (4.3) перепад давления определяли по формуле:

$$\Delta P = A \cdot H_{сл} \cdot w_0^n = \rho_{нас} \cdot \left( \frac{H_{сл}}{d_{эке}} \right)^{0,37} \cdot H_{сл} \cdot w_0^{1,6} \quad (4.9)$$

В расчетах использовали экспериментально определенные значения насыпной плотности шихт ( $\rho_{нас}$ ) и рассчитанное по формуле (4.1) значение эквивалентного диаметра  $d_{эке}$  (таблица 4.7). Высота слоя модельной шихты  $H_{сл}=0,27$  м.

Например, по формуле (4.9) перепад давления, соответствующий перепаду давления в слое шихты основностью 2,5 абс. ед., расположенном в центральной зоне паллеты для расхода воздуха 8,4 м<sup>3</sup>/час определяется следующим образом:

$$\Delta P_{центр}^{расчет} = 1760 \cdot \left( \frac{0,27}{0,00267} \right)^{0,37} \cdot 0,27 \cdot 0,46^{1,6} = 757 \text{ Па}$$

Аналогично определены значения перепада давления для других условий (таблица 4.12).

Сопоставимость результатов эксперимента с данными, полученными расчетным путем, оценивали, рассчитав множественный коэффициент корреляции в среде программы Microsoft Excel. Высокие значения коэффициентов корреляции ( $K_1=0,978$  для шихты основностью 2,5 абс. ед. и  $K_2=0,996$  для шихты основностью 3,5 абс. ед.) свидетельствуют о достаточной сопоставимости результатов.

Проведенные опыты указывают на нестабильность газодинамического сопротивления слоя шихты по ширине агломашины. Шихта в прибортовых зонах паллет обладает большей газопроницаемостью по сравнению с шихтой осевой зоны. Количественно разница составляет не менее 12-15%, причем в реальных усло-

виях это значение значительно выше и достигает 25-50% из-за пристеночного эффекта и бортовых прососов воздуха [17].

Таблица 4.12. Расчетные значения перепада давления

Зона на паллете	Параметры воздушного потока	Газодинамические свойства аглошихты						Среднее *)
		$\Delta P$ , Па	$C$ , Па/м	$\Delta P$ , Па	$C$ , Па/м	$\Delta P$ , Па	$C$ , Па/м	
	$Q$ , м <sup>3</sup> /час	8,4		9,8		11,3		
	$w_0$ , м/с (расчетная)	0,46		0,54		0,62		
Шихта основностью 2,5 абс. ед.								
Левый борт		670	2482	850	3148	1020	3777	$\frac{847}{3135}$
Центр		757	2804	978	3624	1220	4520	$\frac{985}{3649}$
Правый борт		689	2553	891	3299	1111	4115	$\frac{897}{3322}$
Разница абс., Па		77	287	108	400	155	574	$\frac{113}{420}$
Разница отн., %		10		11		13		11,5
Шихта основностью 3,5 абс. ед.								
Левый борт		695	2574	870	3222	1074	3977	$\frac{879}{3258}$
Центр		782	2896	1010	3743	1260	4668	$\frac{1018}{3769}$
Правый борт		718	2661	929	3439	1158	4290	$\frac{935}{3463}$
Разница абс., Па		75	278	111	412	144	535	$\frac{110}{408}$
Разница отн., %		10,0		11,0		11,5		10,8

\*) в числителе приведено значение  $\Delta P$ , в знаменателе –  $C$  (по формуле 4.2)

Вертикальная скорость спекания прямо пропорциональна газопроницаемости, а, следовательно, скорости фильтрации воздуха через слой, которая в свою очередь зависит от параметров слоя и разрежения под колосниковой решеткой [145]. При постоянном разрежении регулировать скорость фильтрации воздуха через слой возможно путем изменения параметров слоя – его высоты и насыпной плотности.

### **4.3. Обоснование рациональных параметров слоя высокоофлюсованной шихты на агломашине**

Рациональные параметры слоя шихты на агломашине обеспечивают достижение заданных показателей по объемам производства и качеству агломерата при спекании высокоофлюсованных шихт. Их обоснование для условий конкретного производства дает возможность разработать меры по повышению эффективности управления процессом спекания высокоофлюсованной шихты.

#### **4.3.1. Высота формируемого на агломашине слоя шихты**

Высота слоя шихты на агломашине является главным параметром, поскольку при ее увеличении кардинально улучшаются температурно-тепловые условия спекания шихты и формирования аглоспека повышенной прочности [147]. Увеличенная высота слоя при спекании высокоофлюсованной шихты обеспечивает следующие преимущества:

- возрастает доля участия в процессе горения топлива регенерированного тепла горячего охлаждающегося аглоспека;
- повышаются температуры и продолжительность пребывания расплава при условиях, благоприятных для кристаллизации основных минералов аглоспека;
- значительно снижается потребность в теплоте от сжигания углерода топлива, доля тепла регенерации в зональных тепловых балансах нагрева шихты нижних элементарных слоев, может достигать 65,5-71,2% [76].

Только в верхних элементарных слоях (140-160 мм от поверхности слоя) нужна повышенная концентрация горючего углерода в шихте, а в нижних элементарных слоях, где достигается высокая доля тепла регенерации в зональных тепловых балансах нагрева слоев, содержание топлива в шихте не должно превышать минимальных значений [1]. Как видно по кривым рисунка 1.7, теоретическая разница по содержанию углерода топлива в шихте верхних и нижних элементарных слоев может достигать 4-5% (кривая 2). В промышленных условиях ЕМЗ эта величина не превышает 0,9-1,3% (таблица 4.6), потому что действующие комбини-

рованное загрузочное устройство при существующем гранулометрическом составе шихты не обеспечивают высокую степень сегрегации частиц твердого топлива, сосредоточение их преимущественно в верхних горизонтах формируемого слоя. И все же, для высокослойного спекания характерна экономия топлива, достигающая в среднем 4-5% на каждые 50 мм увеличения высоты слоя [1]. При этом повышение степени сегрегации шихты по углероду твердого топлива может давать дополнительную экономию топлива от 2,2 до 6,2% для слоев высотой, соответственно, 220 и 550 мм, согласно расчетам, приведенным в монографии [17].

Стремление к увеличению высоты спекаемого слоя шихты подтверждает опыт отечественной и мировой агломерации. Если рекордом 60-х годов прошлого века считалось спекание железоконцентратных шихт в слоях высотой 280-300 мм, то в последние десятилетия в России хорошо подготовленные шихты спекают в слоях 400-550 мм, а за рубежом в слоях 600-700 мм. На Магнитогорском металлургическом комбинате по проекту КНР в 2017 г. сооружена и запущена агломашина, на которой должны спекать шихту в слое 700 мм [1].

Высокослойное спекание шихты, как правило, сопровождается, уменьшением расхода твердого топлива, повышением прочности, улучшением гранулометрического состава агломерата, соответствующим значительным улучшением показателей доменного производства. Возможно увеличение и производительности агломашин.

Отметим, что в производственных условиях решение вопроса об оптимальной высоте слоя шихты находится как компромисс, обеспечивающий рациональное сочетание скорости спекания (производительности агломашин) и прочности агломерата. При отсутствии жестких требований в отношении объемов производства агломерата решение по увеличению высоты спекаемого слоя принимают исключительно по соображениям повышения прочности, улучшения гранулометрического состава агломерата, потребностей сокращения расхода твердого топлива на агломерацию.

Опыт производства высокоосновного агломерата на ЕМЗ (подраздел 3.2) является примером следования по пути неуклонного удерживания рациональной



высоты спекаемого слоя. Результаты лабораторных и промышленных исследований, освещенные в работе [117], а особенно промышленные данные 2019 г. (таблица 3.1) показывают, что даже в чрезвычайных шихтовых и технологических условиях высота спекаемого слоя удерживалась на достаточном уровне (300-350 мм) для достижения необходимой прочности агломерата.

Поставленная цель, как видно по данным за 2019 г. (таблица 3.1) и анализу производственных показателей (подраздел 3.2), достигалась вполне успешно.

С учетом обобщенных в подразделе 3.1 данных о значительном повышении скорости спекания высокоофлюсованных шихт и имеющегося опыта производства высокоосновного агломерата в аглоцехе ЕМЗ, считаем обоснованным и целесообразным применение в дальнейшем технологического регламента спекания высокоосновной шихты в повышенных слоях высотой 350-400 мм. Естественно, при выполнении системных мероприятий, касающихся повышения качества подготовки шихты и улучшения состояния газодинамических сетей агломашин.

Рациональным подходом к формированию профиля слоя на агломашине, отличающимся научной новизной, является плавное увеличение высоты слоя на периферийных участках, представленных более крупной шихтой и меньшим содержанием топлива вследствие неравномерного ее распределения в загрузочной воронке. Периферийное увеличение высоты слоя позволяет выравнивать скорость фильтрации воздуха и, соответственно скорость спекания шихты по ширине слоя, способствуя повышению удельной производительности агломашин за счет уменьшения вредных прососов, повышения выхода годного продукта из спека.

#### **4.3.2. Технологически рациональное и относительно стабильное во времени распределение по высоте слоя гранулометрического состава шихты, основности, горючего углерода**

Повышение основности шихты вызывает изменение сегрегационных процессов не только в загрузочной воронке, как было рассмотрено в подразделе 4.1.1, но и на агломашине.

От рационального распределения грансостава, твердого топлива и основности по высоте слоя в значительной мере зависят прочность агломерата и производительность агломашин. Управляет распределением шихты по высоте слоя процесс сегрегации, без которого невозможно провести нормальное спекание шихты.

В мелких гранулах, сегрегирующих в верхние горизонты укладываемого на паллеты слоя шихты, сосредоточено, в основном, измельченное твердое топливо и известняк. Поэтому содержание горючего углерода  $C_{гор}$ , оксида кальция  $CaO$  и основность в направлении поверхности слоя непрерывно повышается (таблица 4.6). На рисунке 4.10 отражены указанные тенденции изменения крупности и химического состава шихты основностью 3,5 абс. ед. в слое высотой 350 мм. Из графиков видна зависимость распределения горючего углерода и основности по высоте от сегрегации частиц фракции 0-3 мм.

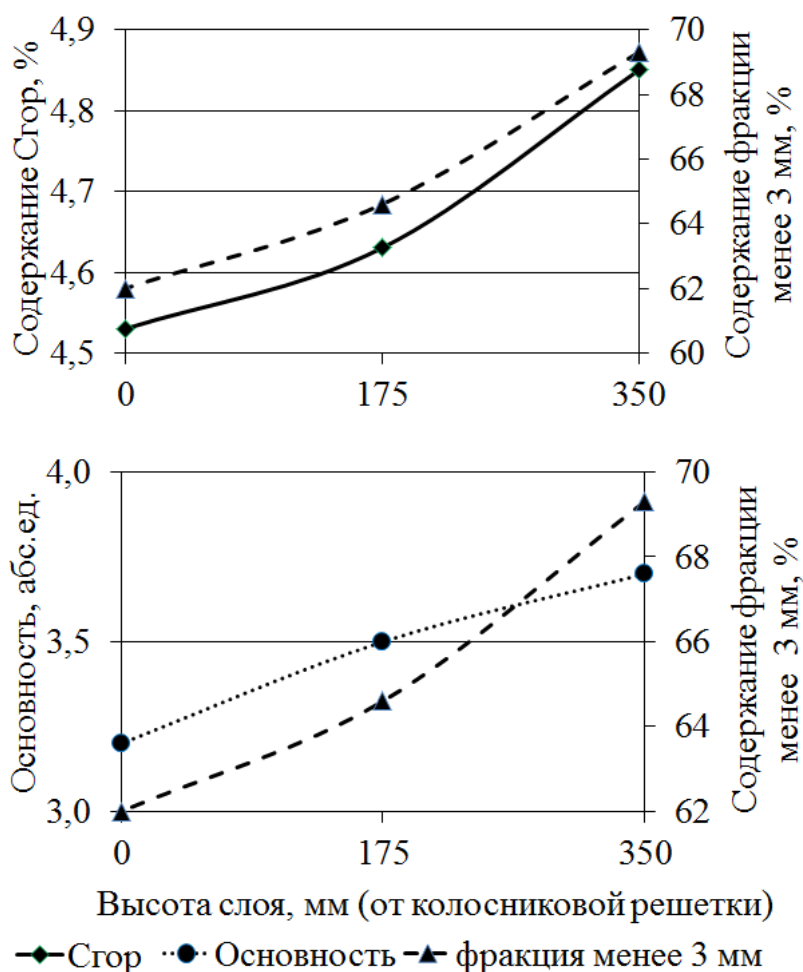


Рисунок 4.10. Изменение крупности и химического состава шихты основностью 3,5 абс. ед. по высоте слоя

Рациональное распределение грансостава шихты по высоте слоя сопровождается снижением газодинамического сопротивления слоя, повышением скорости фильтрации всасываемого воздуха, увеличением скорости спекания и, соответственно, производительности агломашин.

Рациональное распределение частиц топлива по высоте слоя находится в полном соответствии с температурно-тепловыми условиями нагрева и плавления шихты в отдельных элементарных слоях по высоте слоя в соответствии с зональными тепловыми балансами, в которых возрастает роль тепла регенерации и снижается роль тепла от сжигания углерода топлива. Концентрация топлива в нижних горизонтах может снижаться до минимальной, достигающей 2,5% (абс.), в сравнении с 6,5% абс. в верхнем слое (рисунок 1.7). В промышленных условиях наблюдается значительно меньшее отличие концентраций углерода твердого топлива и средней крупности шихты по высоте слоя (рисунок 4.11). По горючему углероду шихты эта разница (верх и низ слоя) во многих случаях не превышает 0,9-1,3% (абс.).

В процессах подготовки и спекания высокофлюсованной шихты имеют место две особенности, которые надо учитывать при подготовке и укладке отдельных компонентов шихты на паллеты.

Первая особенность при содержании в аглошихте менее 5%  $\text{SiO}_2$  состоит в образовании двухкальциевого силиката  $\beta$ -модификации, составляющего, например, при спекании шихт основностью 3,0 абс. ед. 30% общей массы минералов связки. Чтобы предотвратить его образование в отдельных макрообъемах нижней части слоя необходимо исключить наличие в твердом топливе крупных фракций, способных сегрегировать в нижние горизонты слоя и создавать там при горении локальные объемы этой фазы. То есть в случае производства высокоосновного агломерата технология измельчения твердого топлива должна обеспечивать получение продукта крупностью 0-3 мм строго не менее 95%, в отличие от ситуации, отраженной в таблице 3.2.

Вторая особенность касается обязательного наличия в загружаемой на агломашину шихте достаточного количества (не менее 10-15%) крупных, более

6-8 мм фракций, способных образовывать в процессе сегрегации слой естественной постели толщиной не менее 30-40 мм. Через такой сплошной слой невозможно проникновение высокоосновного расплава повышенной текучести в щели колосниковой решетки паллет агломашин. Нужное количество крупных фракций в шихте обеспечивается выделением из агломерата достаточного количества возврата крупностью до 10-14 мм и применением аглоруды в количестве, не меньшем 10-15% в рудной части шихты.

Рациональное распределение гранулометрического состава, горючего углерода и основности в объеме шихты достигаются при обеспечении ее эффективной сегрегации по высоте слоя. Для этого необходимы стабильность поступления на откос слоя на агломашине потока шихты и рациональная полидисперсность гранулометрического состава шихты, рациональные динамические и статические характеристики механизмов и узлов загрузочного устройства.

Стабильное распределение шихты по высоте слоя достигают путем:

- максимально возможного увеличения частоты вращения барабанного питателя при соответствующем уменьшении высоты разгрузочной щели загрузочной воронки;

- применения стабилизатора потока шихты, поджимающего слой на выходе шихты из щели загрузочной воронки и передающего ее на начало загрузочного лотка, тем самым увеличивая его рабочую длину и уменьшая высоту падения гранул шихты на лоток.

Итак, рациональные характеристики распределения:

- а) гранулометрического состава – это близкое к линейному увеличению крупности шихты по среднему диаметру от верхнего к нижнему горизонтам слоя; массовая доля классов более 5-7 мм должна составлять примерно 7-10% для формирования необходимой толщины естественной постели на колосниковой решетке паллет;

- б) основности шихты и горючего углерода в составе шихты – близкое к линейному распределению названных величин – от максимальных вверху до минимальных внизу слоя.

При загрузке шихты на агломашину сегрегация частиц шихты происходит на поверхности загрузочного лотка 3 (рисунок 4.2) и по откосу формируемого на агломашине слоя. Обладающие большей кинетической энергией крупные и тяжелые частицы «обгоняют» более мелкие частицы и укладываются в нижние горизонты слоя. Результатом сегрегации, который имеет важное значения для температурно-тепловых условий аглопроцесса, является неравномерное распределение частиц твердого топлива по высоте слоя, что и отражено на рисунке 4.10.

Распределение топлива в слое связано не только с величиной сегрегации материалов по крупности, но и по плотности. При повышении основности шихты на 1,0-1,5 абс. ед. массовая доля частиц известняка увеличивается в 1,5-2,5 раза. Насыпная плотность частиц известняка 1200-1500 кг/м<sup>3</sup>, насыпная плотность коксика – 530 кг/м<sup>3</sup>. Следовательно, частицы известняка, соответствующие по крупности частицам топлива, обладают по сравнению с ними большей скоростью движения по плоскости загрузочного лотка и сегрегируют в средние горизонты слоя. Очевидно, что степень сегрегации частиц коксика в верхние горизонты слоя возрастает. При сравнении данных изменения массовой доли углерода топлива шихты ЕМЗ сверху вниз слоя (рисунок 4.10) с данными для аглошихт обычной основности Орско-Халиловского меткомбината, метзавода им. Серова (ныне ПАО «Надеждинский металлургический завод») и Качканарского ГОКа, сделан вывод о том, что степень сегрегации частиц топлива в верхние горизонты слоя возрастает ориентировочно на 0,2-0,3% (абс.) при повышении основности на 1,0-1,5 абс. ед.

#### **4.3.3. Насыпная плотность шихты**

Насыпная плотность шихты в слое является важной физико-механической характеристикой, связывающей скорость спекания и прочность спека. Каждой шихте соответствует свое оптимальное значение насыпной плотности. В промышленных условиях насыпную плотность обычно не регулируют, однако в случае загрузки на паллеты высокоофлюсованной шихты проблема повышения плотности верхнего элементарного слоя заслуживает отдельного внимания.

Из промышленных данных ЕМЗ (таблица 4.6) видно, что насыпная плотность по высоте и ширине слоя высокоосновной шихты распределена неравномерно. Она отличается на 100-160 кг/м<sup>3</sup> по высоте и в среднем на 40-70 кг/м<sup>3</sup> по ширине слоя. У бортов паллеты эта разница более существенная, чем в центре. Разница между насыпной плотностью верхних горизонтов шихты по ширине агломашины составляет 80-100 кг/м<sup>3</sup>.

Очевидно, что при невысокой насыпной плотности в среднем по слою 1690 кг/м<sup>3</sup> при спекании шихты основностью 3,5 абс. ед. газопроницаемость слоя и скорость спекания увеличиваются в отличие от прочности агломерата. Согласно обширным исследованиям, приведенным автором работы [17], максимум выхода годного агломерата достигается при плотности шихты 1800-2010 кг/м<sup>3</sup>. Существенно меньшая насыпная плотность верхних элементарных слоев, особенно прибортовых зон, также сопровождается потерей прочности агломерата, получаемого из этой части шихты. Отмеченное позволяет заключить необходимость некоторого подуплонения верхнего слоя шихты, причем для прибортовой части слоя требуется большее уплотняющее воздействие, которое может быть различным у левого и правого борта паллеты.

Во всех случаях практики, особенно в условиях производства высокоофлюсованного агломерата, необходимо регулируемое уплотнение верхней части слоя шихты с целью увеличения ее плотности до уровня плотности шихты средних по высоте слоя горизонтов. Для условий спекания высокоофлюсованной шихты, приведенным в таблице 4.6, рациональным является увеличение насыпной плотности верхних горизонтов слоя на 150-160 кг/м<sup>3</sup>.

#### **4.4. Расчет профиля шихты на агломашине**

Для обеспечения рациональных параметров слоя, обоснованных в подразделе 4.3, предлагается совершенствование технологии загрузки высокоофлюсованной шихты на агломашину с целью регулирования скорости спекания по ширине слоя. Для достижения равномерного спекания необходимо стабилизировать

газодинамическое сопротивление слоя по ширине агломашины за счет корректировки его профиля.

Суть предлагаемого способа регулирования скорости спекания по ширине агломашины состоит в реализации следующего технологического регламента:

1. Минимизация негативных сегрегационных процессов по ширине загрузочной воронки за счет сглаживания формы поверхности слоя, образующегося в ней при ссыпании потока шихты с барабана-окомкователя.

2. Формирование на агломашине 1 слоя шихты с вогнутопараболической формой поверхности 2 с высотой 4, увеличивающейся к бортам 3 (рисунок 4.11). Основную высоту слоя 350-380 мм обеспечивает шихта осевой зоны. В прибортовых зонах паллеты высота слоя увеличивается за счет загрузки дополнительных порций шихты.

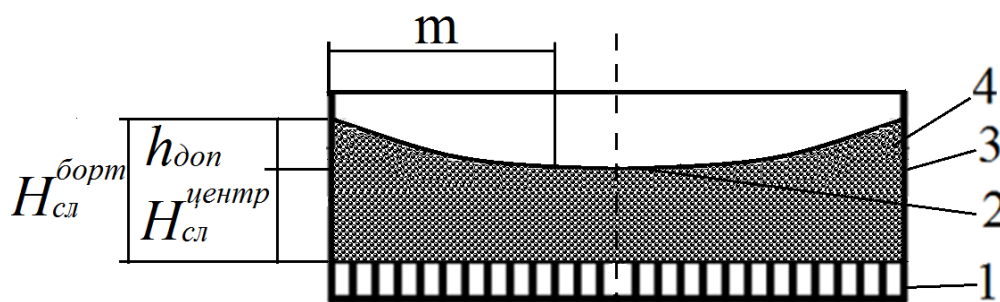


Рисунок 4.11. Рациональная форма слоя шихты на агломашине после ее загрузки:

- 1 – паллета агломашины (вид спереди); 2 – поверхность слоя; 3 – борт паллеты;  
4 – прибортовая зона слоя

3. Уплотнение и заглаживание криволинейной поверхности слоя шихты. Причем на шихту прибортовых зон должно быть оказано большее уплотняющее воздействие, чем на шихту осевой зоны.

Определение высоты слоя в прибортовой зоне 4 паллеты (рисунок 4.11) основано на необходимости обеспечения равенства газодинамического сопротивления прибортовых и осевой зон слоя, характеризуемого величиной перепада давления воздуха при просасывании его через слой шихты. Это равенство можно представить в виде:

$$\Delta P_{\text{борт}} = \Delta P_{\text{центр}} \quad (4.10)$$

где  $\Delta P_{\text{борт}}$ ,  $\Delta P_{\text{центр}}$  – перепад давления воздуха при просасывании его через слой шихты в прибортовой и центральной зоне паллеты соответственно, мм.вод.ст.

В инженерной математической модели газодинамики агломерационного процесса для всего слоя шихты используют формулу Л.К. Рамзина (4.3), которая позволяет сравнивать различные шихты по газодинамическому сопротивлению и условиям спекания [17]. В формуле (4.3) значение коэффициента газодинамического сопротивления  $A$  можно ориентировочно определить по формуле (4.5), предложенной в работе [146].

Подставив зависимость (4.5) в формулу (4.3) получим выражения для определения перепада давлений в слое шихты, уложенной в центральной и прибортовой зонах паллеты:

$$\Delta P_{\text{центр}} = \rho_{\text{центр}} \cdot \left( \frac{H_{\text{сл}}^{\text{центр}}}{d_{\text{экв}}^{\text{центр}}} \right)^{0,37} \cdot H_{\text{сл}}^{\text{центр}} \cdot w_0^n \quad (4.11)$$

$$\Delta P_{\text{борт}} = \rho_{\text{борт}} \cdot \left( \frac{H_{\text{сл}}^{\text{борт}}}{d_{\text{экв}}^{\text{борт}}} \right)^{0,37} \cdot H_{\text{сл}}^{\text{борт}} \cdot w_0^n \quad (4.12)$$

где  $H_{\text{сл}}^{\text{центр}}$ ,  $H_{\text{сл}}^{\text{борт}}$  – высота слоя шихты в центральной и прибортовой зоне паллеты соответственно, м;

$\rho_{\text{центр}}$ ,  $\rho_{\text{борт}}$  – насыпная плотность шихты в центральной и прибортовой зоне паллеты соответственно, кг/м<sup>3</sup>;

$d_{\text{экв}}^{\text{центр}}$ ,  $d_{\text{экв}}^{\text{борт}}$  – эквивалентный диаметр частиц шихты в центральной и прибортовой зоне паллеты соответственно, м.



Подставив выражения (4.11) и (4.12) в равенство (4.10), и с учетом необходимости обеспечения равной по ширине паллеты скорости фильтрации воздуха, сократив на  $w_0^n$ , получим:

$$\rho_{\text{борт}} \cdot \left( \frac{H_{\text{сл}}^{\text{борт}}}{d_{\text{экв}}^{\text{борт}}} \right)^{0,37} \cdot H_{\text{сл}}^{\text{борт}} = \rho_{\text{центр}} \cdot \left( \frac{H_{\text{сл}}^{\text{центр}}}{d_{\text{экв}}^{\text{центр}}} \right)^{0,37} \cdot H_{\text{сл}}^{\text{центр}} \quad (4.13)$$

Величину, показывающую, во сколько раз высота слоя прибортовой зоны должна быть больше высоты слоя центральной зоны паллеты обозначим  $X$ . Тогда высоту слоя в прибортовой зоне можно определить по формуле:

$$H_{\text{сл}}^{\text{борт}} = X \cdot H_{\text{сл}}^{\text{центр}} \quad (4.14)$$

После подстановки формулы (4.14) в выражение (4.13) получим:

$$\rho_{\text{борт}} \cdot \left( \frac{X \cdot H_{\text{сл}}^{\text{центр}}}{d_{\text{экв}}^{\text{борт}}} \right)^{0,37} \cdot X \cdot H_{\text{сл}}^{\text{центр}} = \rho_{\text{центр}} \cdot \left( \frac{H_{\text{сл}}^{\text{центр}}}{d_{\text{экв}}^{\text{центр}}} \right)^{0,37} \cdot H_{\text{сл}}^{\text{центр}} \quad (4.15)$$

Упростив левую и правую части равенства (4.15) на выражение  $((H_{\text{сл}}^{\text{центр}})^{0,37} \cdot H_{\text{сл}}^{\text{центр}})$  и решив его относительно  $X$  получим:

$$X = \left( \frac{\rho_{\text{центр}}}{\rho_{\text{борт}}} \right)^{0,73} \cdot \left( \frac{d_{\text{экв}}^{\text{борт}}}{d_{\text{экв}}^{\text{центр}}} \right)^{0,27} \quad (4.16)$$

Таким образом, после подстановки (4.16) в выражение (4.14) видно, для определения высоты слоя в прибортовой зоне паллеты, необходимы данные о насыпной плотности и эквивалентном диаметре частиц шихты по ширине паллеты, а именно в ее осевой и прибортовых зонах:

$$H_{сл}^{борт} = \left( \frac{\rho_{центр}}{\rho_{борт}} \right)^{0,73} \cdot \left( \frac{d_{экв}^{борт}}{d_{экв}^{центр}} \right)^{0,27} \cdot H_{сл}^{центр} \quad (4.17)$$

Формула (4.17) справедлива в том диапазоне факторов, в котором проведены исследования. Для определения высоты слоя в прибортовых зонах паллеты для условий спекания шихт основностью 3,5 абс. ед., рассмотренных в таблицах 4.5 и 4.6, при высоте слоя в центральной зоне  $H_{сл}^{центр} = 350$  мм выполнены расчеты по формуле (4.17). Получены следующие результаты:

1. Высота слоя шихты у левого борта паллеты:

$$H_{сл}^{борт} = \left( \frac{1790}{1690} \right)^{0,73} \cdot \left( \frac{0,0029}{0,0020} \right)^{0,27} \cdot 350 = 402 \text{ мм}$$

2. Высота слоя шихты у правого борта паллеты:

$$H_{сл}^{борт} = \left( \frac{1790}{1690} \right)^{0,73} \cdot \left( \frac{0,0025}{0,0020} \right)^{0,27} \cdot 350 = 386 \text{ мм}$$

Таким образом, для выравнивания газопроницаемости шихты по ширине агломашины, высоту слоя у левого борта следует увеличить на 52 мм, а у правого на 36 мм. В производственных условиях такая точность измерений не достигается и не требуется. Поэтому, в рассматриваемых условиях рациональным является увеличение высоты слоя в прибортовых зонах паллеты на 50 мм. При повышении содержания в окомкованной шихте крупных фракций высота слоя у борта будет выше высоты центральной зоны на 50-70 мм.

Расчет показал, что для выравнивания скорости спекания высота слоя, укладываемого в прибортовых зонах, может различаться с левой и с правой стороны паллеты, то есть профиль слоя на паллете может быть несимметричный относительно продольной оси агломашины.

Таким образом, увеличение высоты слоя в прибортовых зонах 4 (рисунок 4.11) должно составлять не менее  $h_{дон}=50-70$  мм, (или 12-15%) в зависимости от высоты слоя в центральной зоне, изменения эквивалентного диаметра гранул и насыпной плотности шихты по ширине агломашины. Следовательно, должна быть создана возможность для регулирования высоты подсыпаемого в прибортовую зону паллеты слоя в зависимости от качества подготовки шихты. Решение о необходимости регулирования высоты слоя в прибортовых зонах паллет агломератчик принимает по форме свечения излома спека в хвостовой части агломашины и по показаниям термопар, установленным в предпоследней вакуум-камере. Разница температур отходящих газов в конце зоны спекания по ширине агломашины должна составлять не более  $50$  °С.

Полученные значения разницы высоты слоя прибортовых и центральной зон паллеты полностью согласуются с данными лабораторных исследований газодинамического сопротивления слоев шихты, расположенных в этих зонах (подраздел 4.2). Экспериментально установленная разница перепада давления воздуха при его просасывании через эти зоны также составляет 12-15%.

Высота слоя от центра к бортам должна увеличиваться постепенно. Ширина  $m$  прибортовой зоны (рисунок 4.11) с увеличивающейся высотой слоя равна длине горизонтального катета треугольника, образующегося при соприкосновении его гипотенузы (откоса слоя) с боковой стенкой паллеты, то есть от точки на паллете, с которой формируется слой с повышающимся содержанием крупных частиц.

Крупность частиц начинает резко возрастать на расстоянии 500-700 мм от борта, что подтверждается графиком изменения эквивалентного диаметра частиц по ширине агломашины, приведенным на рисунке 4.8. Таким образом, ширина составляет  $m=500-700$  мм в зависимости от гранулометрического состава окомкованной шихты.

## Выводы

1. Установлено, что по ширине загрузочной воронки вертикальное сечение конуса загрузки, сформированного падающей из барабана-окомкователя шихтой, имеет форму выпуклой параболы, по ветвям которой крупные гранулы шихты сегрегируют к стенкам загрузочной воронки. Структура слоя шихты по ширине загрузочной воронки неоднородна. Неравномерности гранулометрического состава шихты и скорости процесса спекания начинают проявляться при переходе линии относительно плоской вершины параболы к ее ветвям. Для высокоофлюсованной шихты содержание фракции более 5 мм у стенок загрузочной воронки выше на 55-60%, чем в осевой части.

2. Экспериментально установлено, что структура слоя, сформированного в загрузочной воронке, синхронно переносится на агломашину. Это ведет к формированию слоя, газопроницаемость которого в направлении от центра к периферии увеличивается минимум на 12-15%.

3. Показано, что химический состав аглошихты основностью 3,5 абс. ед. неоднородный по ширине и высоте слоя на агломашине. Содержание углерода в прибортовых зонах паллеты на 0,2-0,35% (абс.) ниже, чем в центральной; колебание содержания железа по ширине и высоте слоя достигают 10% (абс.); колебание содержания СаО – 2-3% (абс.).

4. Определено, что насыпная плотность верхнего горизонта слоя аглошихты ниже на 100-160 кг/м<sup>3</sup> плотности шихты среднего горизонта, у бортов эта разница выше, чем в центральной части слоя.

5. Сформулированы и обоснованы рациональные параметры слоя высокоофлюсованной шихты на агломашине:

- высота слоя не менее 350-380 мм, плавно увеличивающаяся на прибортовых участках на 50-70 мм;
- рациональное и стабильное распределение гранулометрического состава, горючего углерода и основности в объеме шихты;

- насыпная плотность шихты верхней и средней части слоя 1790-1800 кг/м<sup>3</sup>.

6. Установлено, что степень сегрегации твердого топлива шихты в верхние горизонты слоя возрастает на 0,2-0,3% (абс.) по мере повышения основности шихты на 1,0-1,5 абс. ед., что обусловлено увеличением в шихте в 1,5-2,5 раза массовой доли частиц известняка, которые, в сравнении с частицами твердого топлива, обладают большей плотностью и скоростью движения по плоскости загрузочного лотка к откосу формируемого на агломашине слоя шихты.

7. Показано, что крупнейший недостаток существующей технологии загрузки шихты проявляется в недогрузке прибортовых зон паллет. Следствием такой укладки является снижение газодинамического сопротивления слоя шихты, который расположен в периферийной зоне. Это обуславливает неравномерность теплообменных процессов в слое, вызывающем ускоренное спекание шихты периферийных зон и замедленное спекание шихты центральной зоны.

8. Показано, что для выравнивания скорости спекания высокоофлюсованной шихты по ширине агломашины необходимо стабилизировать газодинамическое сопротивление слоя шихты по его ширине. Это обеспечивается путем формирования слоя с вогнутопараболической поверхностью, которая соответствует кривой, характеризующей изменение газодинамического сопротивления слоя. Для этого необходимо постепенное увеличение высоты слоя от 350-380 мм в центральной зоне агломашины к 400-430 мм у ее бортов.

Основные положения данного раздела опубликованы в работах [136, 137, 140, 148].

**РАЗДЕЛ 5.****СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЗАГРУЗКИ ШИХТЫ НА АГЛОМАШИНУ**

Для решения задачи формирования на агломашине слоя высокоофлюсованной шихты с рациональными параметрами, обоснованными в подразделе 4.3, в диссертационной работе предложена конструкция загрузочного комплекса шихты на паллеты агломерационных машин, описанная в публикациях [136, 137, 141]. Общая компоновочная схема загрузочного комплекса приведена на рисунке 5.1.

Схема крепления направляющих элементов представлена на рисунке 5.2. Фрагменты, детализирующие виды по стрелкам *Д*, *Е*, *Ж* (рисунок 5.1), отражены на рисунках 5.4 и 5.5.

**5.1. Совершенствование распределения шихты в загрузочной воронке и на агломашине**

Для минимизации влияния негативных сегрегационных процессов в загрузочной воронке на структуру слоя на агломашине следует сгладить форму поверхности засыпи, которая образуется в загрузочной воронке при ссыпании потока шихты с барабана-окомкователя. Для реализации этого мероприятия барабан-окомкователь и загрузочную воронку предложено модернизировать, оснастив их устройством для подготовки шихты к спеканию.

На разгрузочном торце барабана-окомкователя 2 (рисунок 5.1) монтируются направляющие элементы 3 под углом  $\alpha$  к вертикальной оси барабана (вид по *А*) с расстоянием  $H$  между ними, подбираемым в зависимости от параметров барабана-окомкователя и режимов его работы. Под барабаном-окомкователем в загрузочной воронке 4 устанавливается распределитель шихты 5.

Угол  $\alpha$  соответствует углу отрыва шихты от внутренней поверхности барабана-окомкователя при движении ее от загрузочной течи к разгрузочному концу.

В зависимости от свойств шихты и параметров работы барабана-окомкователя угол наклона направляющих элементов  $\alpha$  можно регулировать в диапазоне  $10-20^\circ$ .

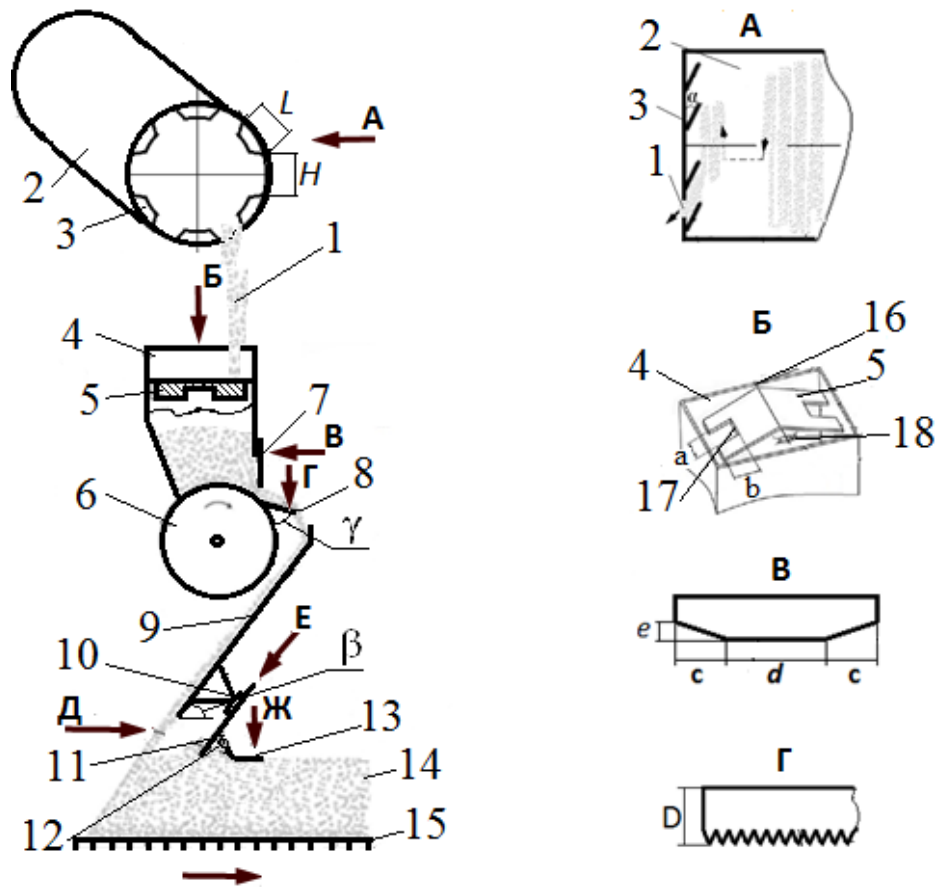


Рисунок 5.1. Схема загрузочного комплекса шихты на паллеты агломерационной машины:

1 – поток шихты; 2 – барабан-окомкователь; 3 – направляющие элементы;  
 4 – загрузочная воронка; 5 – плиты распределителя шихты; 6 – барабанный питатель;  
 7 – шиберная заслонка; 8 – зубчатый стабилизатор потока шихты; 9 – первая ступень загрузочного лотка; 10 – консоль; 11 – вторая ступень загрузочного лотка; 12 – подвижная тяга; 13 – секционная гладилка; 14 – слой шихты; 15 – паллета;  
 16 – поворотная ось; 17 – вырезы в плитах распределителя;  
 18 – ограничитель движения

Направляющие элементы представляют собой стальные листы 1 (рисунок 5.2 *a*), вырезанные в форме сегмента высотой  $S$ . Их поверхность покрыта антиадгезионным и абразивостойким материалом, например, пленкой из фторполимеров.

К выпуклой стороне 2 приварены головки двух болтов 3 (например, М16 или М18). Для крепления направляющего элемента к стенке барабана-окомкователя в ней на расстоянии  $M$  от разгрузочного торца 4 (рисунок 5.2 б) прорезаны отверстия 5 и 6 для обеспечения возможности изменения угла установки сегмента. В таблице 5.1 приведены ориентировочные габариты направляющего элемента для условий аглоцеха ЕМЗ.

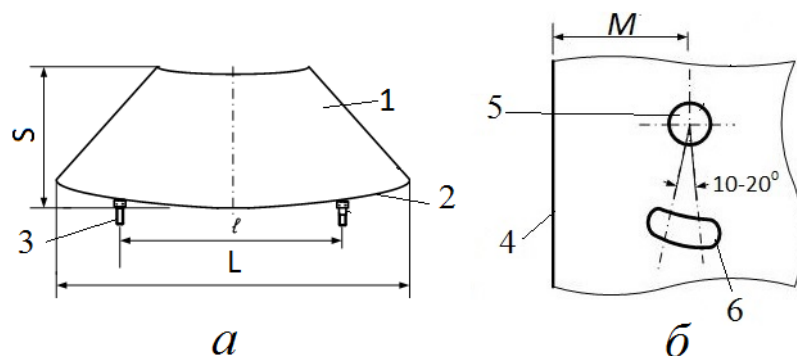


Рисунок 5.2. Направляющий элемент:

$a$  – общий вид;  $b$  – схема крепления;

1 – стальной лист, вырезанный в форме сегмента; 2 – выпуклая сторона направляющего элемента; 3 – болты для крепления; 4 – разгрузочный торец барабана-окомкователя; 5, 6 – отверстия для крепления

Таблица 5.1. Габариты направляющих элементов

Параметр	Размеры, мм
Толщина листа	10
Высота $S$	200
Длина выпуклой стороны $L$	500-700
Расстояние между головками болтов $l$	350-400
Расстояние от разгрузочного торца $M$	100
Угол установки $\alpha$	10-20 <sup>0</sup>
Расстояние между направляющими элементами $H$	300-400

Распределитель шихты 5 (рисунок 5.1) выполнен в виде двух плит (вид по Б), соединенных под углом 120-140<sup>0</sup> друг к другу, которые опираются на ось поворота 16. Плиты имеют вырезы 17 для ссыпания шихты. Угол качания плит составляет 50<sup>0</sup> и лимитируется ограничителем 18. Длина  $a$  выреза 17 равна 0,3 ши-



рины плиты 5, глубина  $b$  – до 0,5 длины плиты. Плиты имеют гибкое противоадгезионное и абразивостойкое покрытие, например, на основе полиэтилена высокого давления или синтетического каучука, способное приподниматься и очищаться от возможных налипаний под действием струй сжатого воздуха, периодически подаваемых из ресивера под гибкие пластины покрытия плит.

Устройство работает следующим образом. Поток 1 (рисунок 5.1) окомкованной полидисперсной шихты, перемещаясь вдоль оси барабана-окомкователя 2, или попадает на поверхности направляющих элементов 3, или проходит между ними. Попадая на них, он задерживается на 1-2 с, сжимается, приобретает большую кинетическую энергию. В результате, падающий поток способен ритмично поворачивать смонтированные в загрузочной воронке 4 плиты распределителя шихты 5, ссыпаясь поочередно на их поверхности. Под действием качающихся струй 1 шихты плиты 5 совершают движения в режиме маятника, обеспечивая ссыпание шихты в загрузочную воронку 4 с поверхностей и через вырезы 17 плит и создавая условия для равномерного распределения шихты.

Для оценки способности распределителя шихты 5 (рисунок 5.1) влиять на форму поверхности слоя в загрузочной воронке, проведен эксперимент по методике, описанной в подразделе 2.2, на физической модели, схема которой приведена на рисунке 2.5.

Результаты, полученные в ходе двух серий экспериментов, представлены на схеме на рисунке 5.3. Видно, что поверхность засыпи, образующейся в модели загрузочной воронки без использования распределителя шихты, имеет выраженную параболическую форму (рисунок 4.3 б). При проведении опытов с монтажом распределителя шихты в модели образовался слой с волнообразной поверхностью с двумя слабовыраженными пиками (рисунок 5.3). Благодаря этому снижается сегрегация крупных частиц в пристеночную зону.

Для эффективной выдачи шихты электровибрационный питатель, входящий в состав действующего комбинированного загрузочного устройства (рисунок 4.2), как обладающий значительными недостатками, проанализированными ранее в подразделе 4.1, рекомендуется заменить барабанным питателем 6 (рисунок 5.1)

диаметром 1200 мм, длиной 2570 мм; с регулируемой частотой вращения в диапазоне 0,4–6 мин<sup>-1</sup>.



Рисунок 5.3. Результат лабораторного исследования влияния распределителя шихты на форму слоя в загрузочной воронке (вид спереди):

1 – модель загрузочной воронки; 2 – поверхность засыпи; 3 – частицы шихты

Барабанный питатель предлагается оснастить шиберной заслонкой 7 и зубчатым стабилизатором потока шихты 8 (рисунок 5.1, вид по *B* и *Г*). Под ними располагается двухступенчатый загрузочный лоток. Его первая ступень 9 выполнена в виде наклонного отражательного листа и обеспечивает беспрепятственную сегрегацию шихты. Поверхность листа покрыта гидрофобным абразивостойким материалом, например фторполимерным листом. Угол наклона  $\beta$  первой ступени загрузочного лотка зависит от свойств шихты и, как принято в практике аглопроизводства, составляет 54-65<sup>0</sup>.

К первой ступени 9 консолью 10 присоединена вторая ступень 11 загрузочного лотка, которая служит для формирования на агломашине слоя с вогнутопараболической поверхностью. А ко второй ступени подвижной тягой 12 присоединена секционная гладилка 13 необходимая для заглаживания и рационального уплотнения поверхности сформированного на агломашине слоя. Нижняя кромка второй ступени 11 опущена на 130-150 мм по отношению к нижней кромке первой ступени 9.

Толщина слоя шихты регулируется шиберной заслонкой 7 (рисунок 5.1, вид по *B*), установленной на разгрузочной щели воронки 4. Наличие в ней угловых срезов длиной  $c$  и высотой  $e$  обеспечивает выдачу с периферийных участков загрузочной воронки большего количества шихты, направляемого на увеличение высоты слоя в прибортовых зонах паллет. Для рассматриваемых условий:

- общая длина шиберной заслонки 2500 мм;
- параметры угловых срезов  $e=50$  мм,  $c=750$  мм;
- длина  $d$  нижней части 1000 мм.

Непрерывность подаваемого барабанным питателем 6 потока шихты обеспечивается зубчатым стабилизатором 8 (рисунок 5.1, вид по *Г*). Он разрушает комья шихты и устраняет их хаотичное падение на первую ступень 9 загрузочного лотка. Зубчатый стабилизатор потока шихты примыкает сплошной стороной к поверхности барабанного питателя под отрицательным углом наклона к горизонту  $\gamma=15-25^{\circ}$ .

Стабилизатор потока шихты представляет собой металлическую пластину длиной, соответствующей длине загрузочной воронки и шириной  $D$  (рисунок 5.1), которая, в зависимости от конкретных условий, обеспечивает поступление шихты на верхнюю часть загрузочного лотка 9. Рекомендуемая ширина  $D$  стабилизатора составляет 150-250 мм, что создает условия для равномерного поступления шихты на загрузочный лоток 9 (рисунок 5.1). Вторая сторона стабилизатора выполнена в виде зубчатого торца с треугольными зубьями. Зубья высотой 30-50 мм имеют треугольную форму. Благодаря такой конфигурации торец стабилизатора не залипает шихтой.

Отрицательный угол наклона  $\gamma$  стабилизатора потока шихты к горизонту можно регулировать в пределах  $15-25^{\circ}$ . Установка стабилизатора потока под меньшим углом ведет к запираанию потока шихты на барабанном питателе. При превышении значения  $25^{\circ}$ , соответствующего приближению к углу внешнего трения шихты о стабилизатор, прекращается поджим шихты на выходе из отверстия загрузочной воронки, нарушается сплошность потока шихты, и стабилизатор начинает работать как наклонный лоток, при этом режим движения потока шихты

приобретает дискретный характер, что установлено исследованиями, проведенными в агломерационном цехе Новолипецкого металлургического комбината [17].

Конструктивные особенности второй ступени 11 загрузочного лотка отражены на рисунке 5.4. Вторая ступень стреловидной конфигурации состоит из металлических пластин 1, соединенных под углом  $140-150^\circ$ , ее нижней кромке 2 придана выпуклопараболическая форма и предусмотрены концевые регуляторы высоты 3, выполненные в виде срезов длиной 500-700 мм, высотой до 50-70 мм.

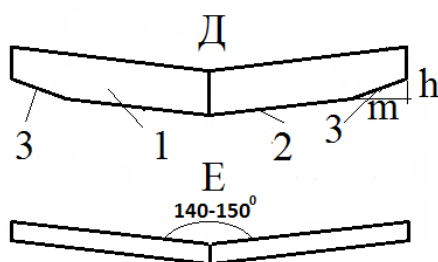


Рисунок 5.4. Вторая стреловидная ступень загрузочного лотка:

1 – металлические пластины; 2 – нижняя кромка; 3 – концевые регуляторы

Параметры  $h$  и  $m$  обоснованы в подразделе 4.4. Рекомендуется предусмотреть возможность изменения габаритов  $h$  и  $m$  при изменении шихтовых условий работы цеха. Эта возможность реализуется путем монтажа на концевых регуляторах подвижных пластин.

Таким образом, конструктивные элементы загрузочного комплекса шихты придают профилю слоя на агломашине форму, которая соответствует кривой, характеризующей изменение гранулометрического состава шихты по ширине загрузочной воронки (рисунок 4.4). Такой подход позволяет решить проблему недогрузки прибортовой зоны паллет и способствует выравниванию вертикальной скорости спекания по ширине слоя.

## 5.2. Уплотнение и заглаживание верхних слоев шихты

Как было обосновано в подразделе 4.3.3 уплотнение и заглаживание поверхностного слоя шихты на паллетах агломашин – заключительная операция

стадии загрузки, необходимая для качественного зажигания топлива под горном и получения прочного спека из уплотненной шихты, которая гарантирует также выравнивание скорости спекания шихты по ширине агломашины. Для практической реализации указанных задач предложена конструкция гладилки поверхности слоя с автономными секциями.

При разработке конструкции гладилки исходили из следующих соображений:

1. Скорость фильтрации газа между слоем и стенкой борта паллеты повышена по сравнению со скоростью фильтрации газа через слой центральной зоны, что обусловлено влиянием пристеночного эффекта. Пристеночный эффект наблюдается в слое у бортов паллет шириной около 6 диаметров частиц шихты. При нормальной работе барабана-окомкователя максимальная крупность частиц не превышает 15 мм, поэтому, можно предположить, что ширина пристеночной зоны составляет не менее 90 мм.

2. В процессе спекания имеет место поперечная усадка слоя шихты. Это сопровождается образованием щели между спекаемым слоем и бортом паллеты, что вызывает бортовые прососы воздуха.

3. Как видно из рисунка 4.9 удельное газодинамическое сопротивление слоя начинает резко снижаться на расстоянии 500-700 мм от борта паллеты. Это является причиной повышенной скорости фильтрации газа через эту зону.

4. При рекомендуемом в данной работе способе загрузки высота слоя шихты на агломашине постепенно увеличивается от центра к бортам, начиная с расстояния  $m=500-700$  мм от борта (рисунок 4.11), резкое увеличение начинается на расстоянии примерно 250 мм от борта. Для качественного зажигания топлива вогнутопараболическую форму поверхности следует выровнять.

Таким образом, для компенсации перечисленных явлений, на слой шириной 500-700 мм от борта паллеты необходимо оказывать большее уплотняющее воздействие, чем на слой центральной зоны. Причем для устранения пристеночного эффекта и выравнивания профиля слоя перед зажигательным горном на поверхность слоя шириной около 250 мм от борта такое воздействие должно быть более

существенное. Для выполнения этих задач в конструкции загрузочного комплекса шихты предусмотрена секционная гладилка с автономными секциями 13 (рисунок 5.1).

Загнутая передняя часть гладилки создает условия для ее плавного скольжения по поверхности и минимизирует разрушающее воздействие кромки гладилки на гранулы шихты. Для рассматриваемых условий предлагаются два вида конструктивного исполнения гладилки: трехсекционная (рисунок 5.5 *а*) или пятисекционная (рисунок 5.5 *б*).

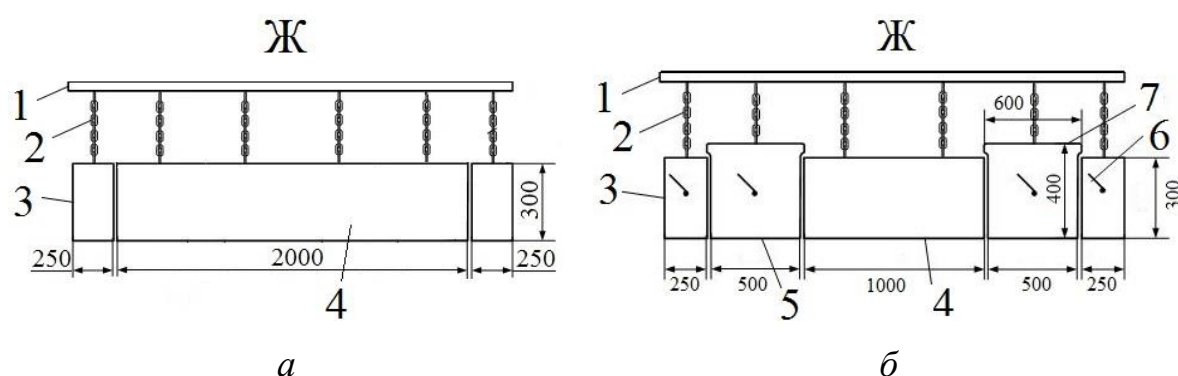


Рисунок 5.5. Принципиальная схема гладилок поверхности слоя аглошихты:

*а* – трехсекционной, *б* – пятисекционной;

1 – штанга для крепления цепных тяг; 2 – цепные тяги, удерживающие секции гладилки; 3 – утяжеленные ( $170-200 \text{ кг/м}^2$ ) секции гладилки для максимального выравнивания и уплотнения периферийных участков слоя шихты; 4 – центральная облегченная секция ( $50-70 \text{ кг/м}^2$ ) для заглаживания осевого участка слоя; 5 – вторые утяжеленные ( $80-120 \text{ кг/м}^2$ ) секции; 6 – штыри для навешивания металлических утяжеляющих дисков; 7 – выступы, исключая образование «гребней» между секциями

Оптимальный вес периферийных и центральных секций гладилок подбирали в условиях аглоцеха путем селекции нагрузки, оказываемой секциями гладилки на слой шихты, исходя из двух принципов:

1. Гранулы шихты не должны разрушаться под воздействием нагрузки, оказываемой гладилкой. Установлено, что гранулы диаметром 7 мм выдерживают, не

разрушаясь, нагрузку в среднем 0,265 кг/гранулу, а диаметром 15 мм – 0,550 кг/гранулу.

2. Для выравнивания криволинейной поверхности слоя на периферийных участках необходимо обеспечить усадку слоя в этих зонах не менее чем на 25-30 мм.

Профиль усилий давления, создаваемого трехсекционной и пятисекционной гладилками по ширине агломашины (рисунок 5.6), подобран таким образом, что гладилка не вызывает разрушение гранул шихты, расположенных в верхнем горизонте слоя, но способствует его уплотнению и улучшению теплотехнических свойств.

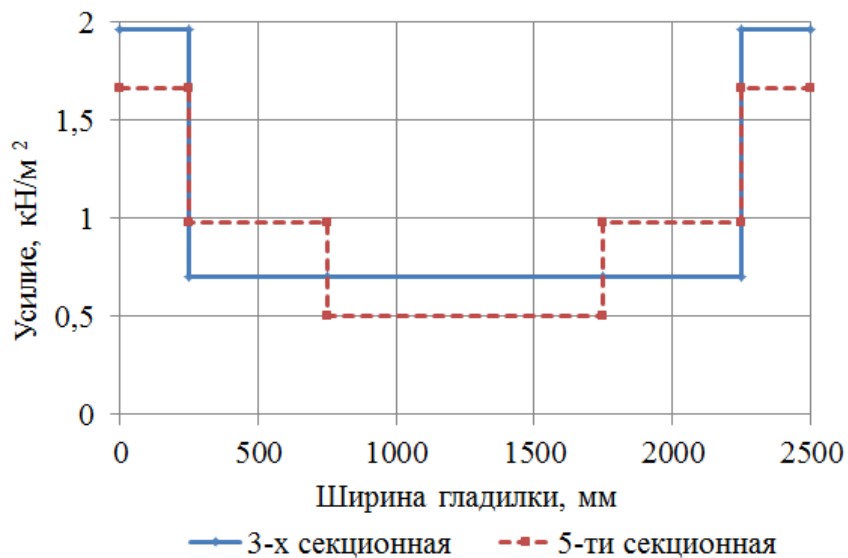


Рисунок 5.6. Профиль усилий по ширине гладилки

Трехсекционная гладилка (рисунок 5.5 а) работает следующим образом. Ее утяжеленные периферийные секции 3 оказывают большее уплотняющее воздействие на шихту в прибортовой зоне паллеты, облегченная секция 4 оказывает существенно меньшее давление на центральную часть слоя. При удельном давлении периферийных, самых тяжелых и узких секций гладилки (поз. 3 рисунок 5.5 а) достигающем 170-200 кг/м<sup>2</sup>, усадка слоя может составлять 25-30 мм и насыпная плотность шихты верхнего элементарного слоя толщиной 30-40 мм повышается

ориентировочно на 150-160 кг/м<sup>3</sup>, достигая значений плотности шихты средних слоев, примерно 1790 кг/м<sup>3</sup>, находящихся на глубине 150-170 мм от верха слоя.

Альтернативная конструкция пятисекционной гладилки отличается тем, что усилие, оказываемое секциями гладилки на слой, возрастает к бортам паллеты постепенно. Давление утяжеленных периферийных секций 3 и 5 (рисунок 5.5 б) можно регулировать, добиваясь рационального уплотнения и заглаживания поверхности наиболее высоких (на 50-70 мм) дополнительных периферийных слоев. На крайних секциях предусмотрены штыри 6 для навешивания металлических дисков, что позволяет увеличивать уплотняющее воздействие на слои прибортовых зон. Кроме того, в зависимости от разницы скорости спекания по ширине слоя можно создать различное уплотняющее воздействие на зоны слоя, расположенные у левого и правого бортов. Выступы 7 исключают образование, так называемых, «гребней» между секциями гладилки.

Трехсекционная гладилка, конструкция которой аналогична, приведенной на рисунке 5.5 а прошла годовое промышленное испытание на четырех агломашинах ЕМЗ. По прямолинейной форме свечения излома спека (рисунок 5.7) видно, что вертикальная скорость спекания по ширине агломашины выровнялась. Процесс спекания в центральной и прибортовых зонах паллеты завершился одновременно, в отличие от ситуации, отраженной на рисунке 4.1.

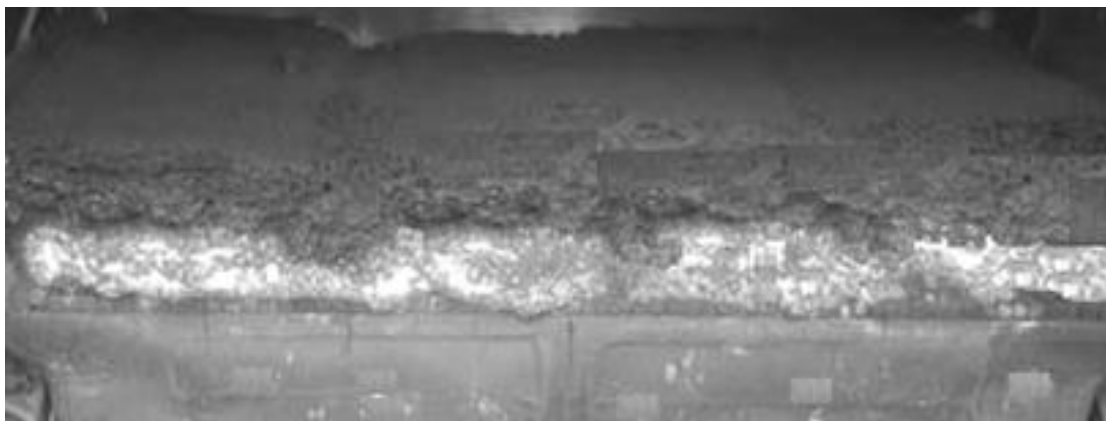


Рисунок 5.7. Фотография излома спека в хвостовой части агломашины после обработки поверхности слоя секционной гладилкой



Удельный расход тепла на зажигание шихты связан с насыпной плотностью шихты обратно пропорциональной зависимостью [17]:

$$q_{зж} = 6 \cdot 10^4 \cdot \frac{\tau_{зж} \cdot w_{гг} \cdot T_{гг} \cdot C_{гг}}{H_{сл} \cdot \rho_{нас} \cdot K_{г}^{ш} (1 - q_{nm})}, \quad (5.1)$$

где  $q_{зж}$  – удельный расход тепла на зажигание шихты, кДж/т агломерата;

$\tau_{зж}$  – продолжительность зажигания, мин;

$w_{гг}$  – скорость фильтрации горновых газов под горном, м/с

$T_{гг}$  – температура горновых газов на входе в слой, °С;

$C_{гг}$  – теплоемкость горновых газов, кДж/(м<sup>3</sup>·°С);

$K_{г}^{ш}$  – выход годного агломерата из шихты, т/т шихты;

$q_{nm}$  – потери тепла через кладку в окружающее пространство в долях к приходу тепла ( $q_{nm} = 0,06$ ).

Изменение удельного расхода тепла на зажигание шихты ( $\Delta q_{зж}, \%$ ) при изменении насыпной плотности можно определить по формуле:

$$\Delta q_{зж} = 100 - \frac{q_{зж2} \cdot 100}{q_{зж1}}, \quad (5.2)$$

где  $q_{зж1}$  и  $q_{зж2}$  – удельный расход тепла до и после повышения насыпной плотности шихты за счет обработки секционной гладилкой с утяжеленными периферийными секциями.

После подстановки формулы (5.1) в (5.2) и упростив полученное выражение получаем:

$$\Delta q_{зж} = 100 - \frac{\rho_{нас1} \cdot K_{г1}^{ш} \cdot 100}{\rho_{нас2} \cdot K_{г2}^{ш}}, \quad (5.3)$$

где  $\rho_{нас1}$  и  $\rho_{нас2}$  - средняя по слою насыпная плотность шихты, кг/м<sup>3</sup>.

$K_{\varepsilon 1}^{ш}$  и  $K_{\varepsilon 2}^{ш}$  - выход годного после обработки поверхности слоя секционной гладилкой.

После обработки верхнего горизонта слоя шихты секционной гладилкой средняя по слою насыпная плотность шихты увеличилась с 1690 кг/м<sup>3</sup> до 1790 кг/м<sup>3</sup>. Повышение прочности верхней части спека за счет рационального уплотнения поверхности шихты обеспечивает увеличение выхода годного продукта из него с 0,59 до 0,60 т/т шихты, что компенсирует снижение скорости спекания уплотненного слоя и сохраняет производительность агломашины на прежнем уровне. Тогда:

$$\Delta q_{зж} = 100 - \frac{1690 \cdot 0,59 \cdot 100}{1790 \cdot 0,60} = 7,2\%$$

Таким образом, при рациональном увеличении насыпной плотности шихты верхнего горизонта слоя на 150-160 кг/м<sup>3</sup> удельный расход тепла на зажигание топлива шихты сокращается на 7,0-7,5%.

### **5.3. Влияние рационального распределения шихты по ширине слоя на газодинамическую работу агломашины**

Задачами исследования влияния предлагаемых мер по рационализации распределения шихты по ширине слоя высокоофлюсованной шихты на газодинамическую работу агломашины являлись:

- сравнение с использованием инженерной модели ВНИИМТ [135], работы агломашины площадью спекания 62,5 м<sup>2</sup>, оснащенной комбинированным загрузочным устройством (рисунок 4.2) с прогнозируемыми результатами работы агломашины при оснащении ее загрузочным комплексом шихты (рисунок 5.1);

- оценка с газодинамической точки зрения эффективности замены комбинированного загрузочного устройства на загрузочный комплекс шихты.

Расчет прогнозных значений показателей процесса спекания для условий аглоцеха ЕМЗ выполнили по математической модели, описанной в работах [17, 26, 27]. Последовательность расчетов следующая:

1. По производственным данным ЕМЗ задались длиной, шириной и площадью периферийной (прибортовой) области, т.е. области, в которой процесс спекания шихты завершен и происходит охлаждение спека.

2. Определили площадь спекания осевой области без прососов воздуха.

3. Задались значениями скоростей фильтрации  $w_o$  в области спекания (в центральной зоне) и у бортов.

4. Приняли, что удельный расход воздуха на спекание составляет  $425 \text{ м}^3/\text{т}$  шихты.

4. Рассчитали потери давления газа в слое спекаемой шихты по формуле (4.3); увеличение объема газа в слое шихты; расход газа на выходе из слоя; потери давления в колосниковой решетке.

Для определения потерь давления газа в колосниковой решетке и других элементах газоотводящего тракта использовали уравнение:

$$\Delta P_i = \xi_i \cdot \frac{\rho_i \cdot w_i^2}{2} \cdot \frac{T_i \cdot P_i}{T_0 \cdot P_0} \quad (5.4)$$

где  $\Delta P$  – потери давления газа, Па;

$P$  – давление, Па;

$\xi$  – коэффициент сопротивления;

$\rho$  – плотность, насыпная плотность шихты,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$w$  – скорость фильтрации воздуха,  $\text{м}/\text{с}$ ;

$T$  – температура,  $^\circ\text{C}$ ;

$O$  – индекс, относящийся нормальным условиям;

$i$  – индекс элемента газоотводящего тракта.

5. Суммируя потери давления в слое и колосниках, определили величину разрежения в вакуум-камерах.

6. По разрежению в вакуум-камере и известной площади неплотностей рассчитали скорость и количество подсосов воздуха в вакуум-камеру через уплотнение.

7. При той же величине разрежения и известной величине коэффициента сопротивления периферийной области  $\xi_{пер}$  рассчитывается расход газа («горячих прососов») через периферийную область:

$$V_{борт} = F_{борт} \cdot w_{борт}, \quad (5.5)$$

где  $V_{борт}$  – расход воздуха через прибортовую (периферийную) зону, м<sup>3</sup>/с;

$F_{борт}$  - площадь прибортовой зоны с прососами, м<sup>2</sup>;

$w_{борт}$  - скорость фильтрации воздуха через прибортовую зону, м/с.

8. По расходам и заданным температурам газа на выходе из области спекания и на выходе из периферийной области  $t_{пер}$  и подсосов воздуха в вакуум-камеру определили среднюю температуру газа в вакуум-камерах  $t_{ск}$ .

9. Расход газа в элементах тракта, его плотность, влагосодержание и температуру рассчитали с учётом подсосов воздуха в элементы тракта.

10. Полученный расход газа после газоочистки подставили в уравнение напорной характеристики эксгаустера:

$$\Delta P_э = \rho \cdot (a + b \cdot V_э - c \cdot V_э^2) \quad (5.6)$$

$$\eta_э = a' + b' \cdot V_э - c' \cdot V_э^2, \quad (5.7)$$

где  $\Delta P_э$  – повышение полного или статического давления эксгаустера, Па;

$\eta_э$  – КПД эксгаустера, доли единицы;

$V_э$  – расход газа, м<sup>3</sup>/час;

$a, b, c$  и  $a', b', c'$  – эмпирические коэффициенты для каждого типа, для эксгаустера Д3500 значения приняты по таблице 8.16, приведенной в работе [17].

11. По значению скорости фильтрации воздуха  $w_{центр}$  в зоне спекания определили вертикальную скорость спекания  $v_{спек}$  (мм/мин), а по ней – производительность агломашины  $Q_{a/m}$  (т/(м<sup>2</sup>·час), потребляемую эксгаустерами мощность  $A$ .

Скорость спекания шихты определяется по формуле:

$$v_{спек} = \frac{60000 \cdot w_0}{V_{уд} \cdot \rho_{нас}}, \quad (5.8)$$

С учетом того, что площадь спекания ( $F_{центр}$ ) меньше общей площади агломашины  $F_{ам}$  на величину площади прибортовой области, в которой процесс спекания уже завершился, и необходимо слой шихты центральной зоны «допекать», уравнение вертикальной скорости спекания в центральной зоне принимает вид:

$$v_{спек}^{центр} = \frac{60000 \cdot w_0 \cdot F_{центр}}{V_{уд} \cdot \rho_{нас} \cdot F_{ам}}, \quad (5.9)$$

где  $F_{ам}$  – площадь агломашины, м<sup>2</sup>;

$F_{центр}$  – площадь зоны спекания (центральной зоны), м<sup>2</sup>, определяется по формуле:

$$F_{центр} = F_{ам} - F_{борт}. \quad (5.10)$$

Производительность агломашины определяется по формуле:

$$Q = 0,06 \cdot v_{спек} \cdot F_{ам} \cdot \rho_{нас} \cdot K_2^{ш}, \quad (5.11)$$

где  $K_2^{III}$  – выход годного агломерата из шихты, т/т шихты. Рассчитать  $K_{год}$  можно по формуле:

$$K_2^{III} = 0,7 \cdot (1 - e^{-5,25 \cdot H_{сl}}). \quad (5.12)$$

Потребляемая эксгаустером мощность определяется по выражению:

$$A = \frac{P_{\Sigma} \cdot V_{раб}}{0,98 \cdot 100 \cdot \eta_{э}}, \quad (5.13)$$

где  $P_{\Sigma}$  – общие потери давления в газоотводящем тракте, Па;

$V_{раб}$  – рабочий расход газа на эксгаустер, м<sup>3</sup>/с;

$\eta_{э}$  – КПД эксгаустера, доли единицы, (определяется по уравнению 5.7).

Расчеты выполняли в среде пакета Microsoft Excel. Исходные данные для расчета, относящиеся к работе агломашины № 3 аглоцеха ЕМЗ приведены в таблице 5.2, результаты расчетов – в таблице 5.3.

Таблица 5.2. Исходные данные по работе агломашины ЕМЗ

Параметр	Значение
1	2
Рабочая площадь агломашины, $F_{ам}$ , м <sup>2</sup>	62,5
Ширина паллет агломашины, $B_{ам}$ , м	2,5
Длина рабочей ветви агломашины, $L_{ам}$ , м	25
Высота слоя шихты, $H_{сл}$ , м	0,35
Длина прибортовой зоны с повышенным прососом воздуха, $l_{борт}$ , м	25
Средняя ширина прибортовой зоны с прососами, $B_{борт}$ , м	0,6
Площадь прибортовой зоны, $F_{борт}$ , м <sup>2</sup>	15
Площадь зоны спекания (центральной зоны), $F_{центр}$ , м <sup>2</sup>	47,5
Число вакуум-камер, $n_{в/к}$ , шт	13
Живое сечение вакуум-камер, $F_{в/к}$ , м <sup>2</sup>	0,56
Живое сечение сборного коллектора, $F_{кол}$ , м <sup>2</sup>	6
Живое сечение батарейного циклона, $F_{БЦ}$ , м <sup>2</sup>	12
Сечение газохода перед эксгаустером, $F_{газох}$ , м <sup>2</sup>	6
Высота щели продольного уплотнения, $\delta_{прод.упл.}$ , м	0,003
Высота щели поперечного уплотнения, $\delta_{попер.упл.}$ , м	0,015

Продолжение таблицы 5.2

1	2
Площадь неплотностей коллектора, $F_{кол.непл.}, м^2$	0,15
Площадь неплотностей батарейного циклона, $F_{БЦ.непл.}, м^2$	0,05
Коэффициент сопротивления слоя, $\xi_{сл}$	11000
Коэффициент сопротивления колосниковой решетки, $\xi_{кол}$	1800
Коэффициент сопротивления приборного слоя, $\xi_{приб}/\xi_{сл}$	0,2435
Площадь неплотностей продольного уплотнения, $м^2$	0,15
Площадь неплотностей поперечного уплотнения, $м^2$	0,075
Общая площадь неплотностей, $м^2$	0,225
Коэффициент сопротивления неплотностей, $\xi_{неплот}$	1,7
Коэффициент сопротивления вакуум-камер, $\xi_{в/к}$	4
Коэффициент сопротивления коллектора, $\xi_{кол}$	12
Коэффициент сопротивления батарейного циклона, $\xi_{БЦ}$	70
Удельный расход воздуха, $м^3/кг$	425
Увеличение объема сухой части газа в слое, $\Delta_{с.г.}, м^3/м^3$	0,017
Влагосодержание газа на выходе из слоя, $f_k, кгH_2O/м^3$	0,143
Влагосодержание воздуха, $f_v, кгH_2O/м^3$	0,01
Насыпная плотность шихты, $\rho_{ш}, кг/м^3$	1720
Скорость паллет, $U_{л}, м/мин$	0,77
Температура окружающей среды, $t_{окр}, ^\circ C$	20
Температура подсосов воздуха, $t_{под}, ^\circ C$	30
Температура на выходе из колосников зоны спекания $t_k, ^\circ C$	215
Температура на выходе из колосников приборной зоне, $t_{приб.з.}, ^\circ C$	270
Выход годного, т агл./т шихты	0,70
Коэффициент потерь тепла вакуум-камер в окружающее пространство, $\varepsilon_{в/к}$	0,06
То же, коллектором, $\varepsilon_{кол}$	0,02
То же, батарейным циклоном, $\varepsilon_{БЦ}$	0,05
Повышение температуры газа в эксгаустерах, $\Delta t_{нагнет}, ^\circ C$	13

Таблица 5.3. Результаты расчета параметров работы агломашин при внедрении мероприятий по формированию рационального слоя высокоосновной шихты

Параметр	Варианты расчета	
	База	Прогноз
1	2	3
Высота слоя, мм	0,35	0,40
Насыпная плотность шихты, $кг/м^3$	1690	1790
Выход годного из шихты, т агл./т шихты	0,59	0,60
Скорость фильтрации воздуха через слой, м/с:		
зона спекания (осевая), $w_{центр}$	0,15	0,15
зона прососов (периферийная), $w_{борт}$	0,26	0,20
Перепад давления газа в слое спекаемой шихты, кПа	1,81	2,07

Продолжение таблицы 5.3

1	2	3
Скорость фильтрации газа на входе в колосники, м/с	0,15	0,15
Потери давления газа в колосниках, кПа	7,00	7,02
Потери давления в вакуум-камерах, кПа	0,04	0,03
Подсосы и прососы воздуха в вакуум-камеры, %	61	53
Подсосы воздуха в сборный коллектор, %	23,13	22,68
Потери давления газа в сборном коллекторе, к Па	0,25	0,19
Потери давления газа в газоочистке, кПа	0,40	0,32
Температура газа перед эксгаустерами, °С	106,00	103,15
Производительность эксгаустера, м <sup>3</sup> /с	44,64	39,28
Разрежение перед эксгаустером, кПа	8,04	8,14
КПД эксгаустеров, %	53,42	49,34
Потребляемая эксгаустерами мощность, кВт	224,04	163,21
Вертикальная скорость спекания, мм/мин:		
зона спекания (осевая), $v_{\text{центр}}$	12,53	11,83
зона прососов (периферийная), $v_{\text{борт}}$	21,30	15,77
с учетом «допекания»	9,52	9,70
Производительность агломашины по шихте, т/ч	60,35	65,12
Производительность агломашины, т агл./ч	35,61	39,07
Подсосы и прососы воздуха, %	69,32	63,56
Удельная производительность агломашины, т/(м <sup>2</sup> ·ч)	0,57	0,63
Производительность агломашины, %	100,00	109,72

Таким образом, из таблицы 5.3 видно, что совершенствование технологии загрузки за счет оснащения агломашин загрузочным комплексом шихты оказывает положительное влияние на их газодинамическую работу. Достигаются следующие преимущества:

- стабилизация скорости спекания по ширине агломерационной машины – разница скорости фильтрации газа по ширине слоя не превышает 0,05-0,07 м/с;
- сокращение на 5,5-6,0% (абс.) подсосов и прососов воздуха;
- увеличение на 1,0-1,5% выхода годного агломерата из шихты;
- снижение потребляемой эксгаустером мощности на 27%;
- возможно повышение удельной производительности агломашины на 7-10% за счет совокупного влияния всех предлагаемых мероприятий по выравниванию скорости спекания шихты по ширине агломашины.



#### **5.4. Влияние рационального распределения шихты по ширине слоя на тепловую работу колосников и подколосниковых балок паллет**

Характерное состояние колосниковой решетки агломашин ЕМЗ перед загрузкой шихты показано на рисунке 4.4. Как известно [17], газодинамическая работа колосниковой решетки агломашины в большей степени зависит не от теоретического живого сечения, а от концентрации частиц шихты в межколосниковом пространстве. При спекании высокоосновных шихт ситуацию, связанную с влиянием на газодинамику процесса, усложняет то, что в щели колосниковой решетки проникает расплав высокой текучести, который заплывает колосниковую решетку монолитной массой. Поэтому для агломашин ЕМЗ актуальна также проблема эффективной самоочистки колосников, не имеющих защитного слоя постели из агломерата.

Удельный расход колосников в аглоцехе составляет 94 г/т агломерата. Это более чем в два раза превышает расход колосников, установленный современными требованиями, согласно которым при охлаждении агломерата на ленте этот показатель должен составлять не более 40 г/т агломерата. Повышенный расход колосников обусловлен их низкой абразивостойкостью и жаропрочностью.

Причинами износа колосников, деформации подколосниковых балок, а также прогиба бортов и корпусов паллеты являются:

1. Ранее рассмотренные процессы неравномерного спекания шихты по ширине агломашины ведут к ускоренному нагреву периферийных частей подколосниковых балок. Кроме того разница температур по длине подколосниковых балок в некоторых случаях достигает 200 °С, что вызывает их тепловую деформацию и ведет к быстрому износу.

2. Продолжительное воздействие высоких температур на колосниковую решетку при частичном охлаждении спека на агломашине.

3. Отсутствие стабильности процесса спекания, обусловленное частыми остановками агломашин, что сопровождается увеличением средней и максимальной температур корпуса паллет.

Агломератчик, согласно заводской технологической инструкции, контролирует исправность колосниковой решетки. Однако, в условиях спекания высокоофлюсованной шихты кроме выполнения требования, касающегося наличия исправной колосниковой решетки, необходимо изменение самой конструкции колосниковой решетки за счет использования колосников большой массы и рациональной формы, исключающей тепловую деформацию самих колосников и подколосниковых балок. Рациональная для ЕМЗ форма массивных (6,5 кг) колосников из жаростойкой стали марки 75Х25Н2ТЛ описана в работе [140].

Важно подчеркнуть, что при внедрении загрузочного комплекса шихты (рисунок 5.1) защита колосников и подколосниковых балок паллет от преждевременного термоабразивного износа достигается за счет следующих факторов:

- формирование слоя естественной постели – загрузочный комплекс шихты активизирует развитие необходимых сегрегационных процессов;
- устранение разницы температур по длине подколосниковых балок исключает их тепловую деформацию за счет выравнивания скорости спекания шихты по ширине слоя.

Таким образом, устранение неравномерности спекания шихты по ширине паллеты, активизация сегрегационных процессов благодаря внедрению предлагаемых мероприятий по регулированию скорости спекания, а также и замена колосников применяемого типа на массивные колосники рациональной конструкции из жаропрочной стали создают удовлетворительные условия для экономичной эксплуатации паллет в целом.

### **5.5. Экономическая и социально-экологическая эффективность применения усовершенствованной технологии загрузки шихты на агломашину**

Проведенные исследования позволили утверждать, что для условий аглоцеха ЕМЗ предлагаемые рекомендации по совершенствованию технологии формирования на агломашине слоя высокоофлюсованной шихты являются рациональными. Их экономическую эффективность оценивали в сравнении с действующей

на предприятии технологией загрузки аглошихты комбинированным грузочным устройством.

Расчет экономической эффективности внедрения разработанных практических рекомендаций рассчитан с точки зрения снижения себестоимости производства высокоосновного агломерата за счет сокращения расхода самого дорогого компонента агломерационной шихты – коксового топлива (Приложение А).

Снижение себестоимости агломерата ( $\Delta C_{агл}$ ) рассчитывали по формуле:

$$\Delta C_{агл} = Ц \cdot \frac{\Delta K}{1000}, \text{ руб./т агломерата} \quad (5.14)$$

где  $Ц$  – цена 1 т коксика, на момент проведения исследований (2019 г.) 2838 руб.;

$\Delta K$  – сокращение расхода коксика после внедрения рекомендаций, кг/т агломерата, в расчетах приняли  $\Delta K = 4$  кг/т агломерата.

Таким образом, снижение себестоимости агломерата составит:

$$\Delta C_{агл} = 2838 \cdot \frac{4}{1000} = 11,35 \text{ руб./т агломерата.}$$

Ожидаемый годовой экономический эффект достигается за счет снижения расхода коксика и определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_Г = \Delta C_{агл} \cdot Пр, \quad (5.15)$$

где  $Пр$  – годовая производительность агломерационного цеха, т/год.

С учетом того, что годовое производство агломерата на ЕМЗ в 2015-2019 гг. составляет в среднем 1,0 млн. т в год, ожидаемый экономический эффект равен:

$$\mathcal{E}_Г = 11,35 \cdot 1\,000\,000 = 11\,350\,000 \text{ руб./год} = 11,35 \text{ млн. руб./год}$$

Доля Асламовой Я.Ю. в ожидаемом годовом экономическом эффекте составляет 5%, то есть 567,5 тыс. руб.

Предлагаемая технология не требует затрат на приобретение дорогостоящего оборудования. Основные элементы загрузочного комплекса шихты на паллеты агломашин могут быть произведены собственными силами предприятия. У сторонних производителей возможно приобретение барабанных питателей.

По результатам исследований [1, 149-152] на предприятиях полного металлургического цикла агломерационные цеха занимают первое место по выбросам пыли и токсичных газов – CO и SO<sub>2</sub> и NO<sub>x</sub> (таблица 5.4).

Таблица 5.4. Вредные выбросы в основных производствах черной металлургии [1]

Виды производств	Доля выбросов в общем количестве, %			
	пыль	CO	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>
Коксохимическое	2,0	7,8	1,0	9,1
Агломерационное	31,1	77,8	61,0	26,0
Доменное	17,3	3,5	0,3	3,0
Сталеплавильное	19,7	5,4	0,02	6,5
Прокатное	1,2	н.св.	0,2	10,5
Огнеупорное и известковое	18,4	0,4	0,4	5,4
Энергетическое (ТЭЦ-ПВС)	7,4	н.св.	36,7	36,6
Ремонтное	1,0	4,9	0,02	1,5
Прочие	1,9	0,2	0,36	1,4

подавляющая часть выбросов агломерации – токсичные газы, образующиеся в процессе горения твердого топлива. Поэтому основным технологическим направлением снижения вредных выбросов является привлечение способов сокращения удельного расхода твердого топлива на процесс спекания агломерационной шихты. Такие технологические решения закреплены в европейской концепции ВАТ (Best Available Technology) – «Наилучшие доступные технологии».

Технологии, признанные лучшими из доступных для агломерационного производства, подробно описаны в документе Европейского Союза [153]. На основе изложенного следует отметить, что сформулированные в работе направления совершенствования технологии агломерации в части модернизации операции загрузки шихты на агломашину соответствуют концепции ВАТ. Снижению расхода

твердого топлива, а, следовательно, выбросов, образующихся вследствие его сжигания, способствуют такие предложенные решения [154]:

- совершенствование операций загрузки за счет формирования рационального слоя шихты в загрузочной воронке и на паллетах агломашин;
- повышение высоты слоя спекаемой шихты;
- оптимизация распределения топлива по высоте и ширине слоя;
- обеспечение стабильной работы агломашин.

Количественная оценка перспектив повышения экологической безопасности приведена в таблице 5.5. Анализ выполнен на основе справочных данных о влиянии технологических факторов на удельный расход топлива и вредные выбросы аглопроизводства, обобщенных в монографии [1].

Таблица 5.5. Ожидаемое повышение экологической безопасности аглоцеха ЕМЗ

Предлагаемые направления совершенствования технологии агломерации	Снижение удельного расхода твердого топлива, %	Снижение газопылевых выбросов, %			
		пыль	СО	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>
Увеличение основности аглошихты на 0,5 абс. ед.	н.св.	н.св.	н.св.	18,3	н.св.
Загрузка шихты КЗУ с двухступенчатым загрузочным лотком и СПШ	3	15	3	н.св.	н.св.
Применение слоя естественной защитной постели	н.св.	30	н.св.	н.св.	н.св.
Увеличение средней высоты спекаемого слоя на 10 мм	0,8-1,0	3,5	1,8	1,1	1,59
Уменьшение массовой доли FeO в агломерате на 1,0-1,5% при оптимизации температурно-тепловых условий спекания высокосной шихты за счет рационального распределения топлива по ширине и высоте слоя	4,2	н.св.	4,2	2,5	н.св.

Таким образом, внедрение предлагаемых в данной работе технологических мероприятий позволит повысить экологическую безопасность агломерационного цеха ЕМЗ за счет сокращения потребления коксика на 10-15%, снижения выбросов пыли и вредных газообразных соединений на 12-15%.

Необходима комплексная реализации технологических и технических средств защиты окружающей среды от выбросов аглофабрик. Техническими средствами защиты окружающей среды являются [155]:

- рециркуляция отходящих газов;
- установка рукавных или электрических фильтров;
- инъекция соответствующих адсорбентов в отходящие газы агломашины для сокращения выбросов  $SO_x$ ,  $NO_x$ , диоксинов и фуранов.
- аспирация мест образования неорганизованных выбросов.

По данным мониторинговых исследований [156] зоны влияния крупных металлургических заводов распространяются на несколько сотен километров. С учетом территориального положения ЕМЗ, зона его влияния распространяется на весь г. Енакиево и за его пределы. Подразделения аглококсодеменного производства наносят громадный ущерб окружающей среде, повышая социально-экологическую напряженность в зонах их расположения.

Опасные токсичные выбросы вызывают рост легочных и онкологических заболеваний, служат причиной повышения уровня смертности не только среди работников аглофабрики, но и среди населения г. Енакиево.

В данном исследовании рассмотрена часть проблемы повышения качества жизни граждан ДНР, проживающих в г. Енакиево, в частности, за счет снижения экологической нагрузки, оказываемой агломерационным цехом ЕМЗ на прилегающие территории. Даже частичное решение названной проблемы позволит улучшить общую эколого-экономическую ситуацию и снизить социальную напряженность.

Социально-эколого-экономическая ситуация – это положение конкретной территории, характеризующееся состоянием трех реальных составляющих: населения, природы и производства, а также условиями и обстоятельствами, определяющими обстановку, положение человека, его поведение в обществе, пространстве и времени [157]. При таком подходе к оценке социальной и эколого-экономической эффективности выгоды от внедрения предлагаемых в работе мероприятий характеризуются следующим:

1. Результаты совершенствования технологии загрузки шихты на агломашину проявляются в снижении расхода твердого топлива на процесс спекания, уменьшении расхода кокса на выплавку чугуна и в целом – в повышении эффективности использования природных ресурсов.

2. Снижаются потоки загрязнений, поступающих в окружающую среду, и сохраняется природный потенциал местности. Это соответствует природоохранному принципу минимизации техногенных нагрузок на экосистемы.

3. Практические рекомендации, разработанные в настоящем исследовании – это оперативные технические мероприятия по снижению загрязнения окружающей среды:

- уменьшение расхода твердого топлива – это соответствующее снижение выбросов токсичных газов ( $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ), диоксинов и фуранов;

- уменьшение объемов потребления кокса на выплавку чугуна – это обязательное, соответствующее сокращение его производства с выводом из эксплуатации и сносом предельно изношенных, устаревших коксовых батарей, отравляющих окружающую среду более чем десятью токсикантами.

4. Инвестиции, необходимые для реализации предложенных мероприятий, не только обеспечивают экономический эффект в виде снижения себестоимости производства агломерата, но и в будущем повышают экологическую и экономическую безопасность общества, способствуют снижению возможной социально-экономической напряженности.

Практические рекомендации по проектированию и совершенствованию загрузочного комплекса и технологии загрузки шихты на агломашину разработаны для условий агломерационного цеха филиала № 2 «ЕМЗ» ЗАО «Внешторгсервис» и включены в подготовленный технический проект его модернизации (Приложение А).

Внедрение загрузочного комплекса гарантирует формирование на агломашине слоя высокоофлюсованной шихты с рациональными физико-механическими параметрами:

- высота слоя на агломашине в центральной зоне паллеты составляет 350-380 мм и плавно увеличивается к бортам до 400-430 мм, что обеспечивает стабилизацию газодинамического сопротивления шихты и, соответственно, выравнивание скорости ее спекания по ширине слоя;

- технологически рациональное и стабильное во времени распределение по высоте слоя грансостава, основности, горючего углерода высокоофлюсованной шихты при обеспечении ее эффективной сегрегации по высоте слоя;

- насыпная плотность шихты примерно  $1800 \text{ кг/м}^3$ ; регулируемое уплотнение верхней части слоя шихты с целью увеличения ее плотности до уровня плотности шихты средних по высоте слоя горизонтов.

В научно-исследовательский процесс внедрены методики:

- исследования показателей распределения шихты в загрузочной воронке и на агломашине;

- лабораторного исследования газопроницаемости слоя шихты по ширине агломашин;

- статистического анализа показателей работы агломашин.

Метод статистической оценки показателей работы агломашин, способ выравнивания скорости спекания по ширине агломашин, способ увеличения насыпной плотности верхних горизонтов слоя шихты, а также обоснованные рациональные параметры слоя высокоофлюсованной шихты, формируемого на агломашине, и установленные закономерности распределения гранулометрического состава шихты по ширине загрузочной воронки и агломашин используются в курсе «Технология подготовки железорудного сырья» при подготовке магистров по направлению подготовки 22.04.02 «Металлургия», магистерская программа «Металлургия чугуна» (Приложение А).

## **Выводы**

1. Предложены практические рекомендации по совершенствованию технологии загрузки высокоофлюсованной шихты на агломашину, которые должны



обеспечивать формирование слоя с рациональными технологическими параметрами. Основная суть рекомендаций следующая:

- снижение негативного влияния сегрегации частиц окомкованной шихты в загрузочной воронке комбинированного загрузочного устройства на структуру слоя, уложенного на агломашину;

- формирование на агломашине слоя с вогнутопараболической поверхностью, высотой в центральной зоне 350-380 мм и плавным увеличением высоты в направлении бортов на 50-70 мм – такая форма профиля соответствует кривой, характеризующей изменение газодинамического сопротивления слоя шихты по ширине загрузочной воронки; профиль слоя может быть несимметричным относительно продольной оси агломашины в зависимости от профиля слоя в загрузочной воронке;

- уплотнение верхних горизонтов слоя шихты с целью рационального повышения ее насыпной плотности на 150-160 кг/м<sup>3</sup>;

- заглаживание специальной гладилкой поверхности слоя шихты с целью увеличения удельных поверхностей контактов между частицами для обеспечения качественного зажигания, спекания верхнего элементарного слоя шихты и получения прочного аглоспека в верхней части слоя.

2. Разработана усовершенствованная конструкция и обоснованы параметры элементов загрузочного комплекса шихты агломашины, а именно:

- а) загрузочную воронку следует оснастить качающимся распределителем шихты для сглаживания поверхности конуса загрузки и снижения развития негативных сегрегационных процессов в загрузочной воронке;

- б) одноступенчатый загрузочный лоток предложено заменить двухступенчатым; первая ступень обеспечивает беспрепятственную сегрегацию шихты; вторая ступень служит для формирования на агломашине слоя с вогнутопараболической поверхностью для выравнивания газодинамического сопротивления по ширине слоя;

- в) гладилку усовершенствованной конструкции с автономными периферийными утяжеленными секциями шириной 250 мм с возможностью регулирования

уплотняющего воздействия на прибортовые зоны слоя рекомендовано использовать для выравнивания и заглаживания поверхности, а также повышения на 150-160 кг/м<sup>3</sup> насыпной плотности верхних горизонтов слоя.

3. Прогнозируется улучшение показателей процесса спекания: повышение средней высоты слоя на агломашине на 50-70 мм; сокращение содержания в агломерате мелких фракций на 1-2% (абс.); снижение расхода твердого топлива на 3-5 кг/т агломерата; уменьшение удельного расхода тепла на зажигание топлива шихты на 7,0-7,5%; сокращение на 5,5-6,0% (абс.) подсосов и прососов воздуха; возможно повышение производительности агломашин на 7-10% за счет совокупного влияния всех предложенных мероприятий.

4. Ожидаемый экономический эффект по агломерационному производству от оснащения агломашин ЕМЗ загрузочным комплексом шихты на паллеты составляет 11,35 млн. руб./год.; долевое участие автора – 5%, то есть 567,5 тыс. руб. Прогнозируемое повышение экологической безопасности агломерационного цеха ЕМЗ обеспечивается технологическими мерами, направленными на сокращение потребления коксика на 10-15% (3-5 кг/т агломерата), снижение выбросов пыли и вредных газообразных соединений на 12-15%. Социально-эколого-экономический эффект достигается за счет снижения экологического ущерба и улучшения качества жизни жителей г. Енакиево. Этому способствует предотвращение загрязнения атмосферного воздуха выбросами аглококсодового производства.

Основные результаты раздела опубликованы в работах [7, 136, 137, 140, 148, 154, 155, 158].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена **актуальная для развития чёрной металлургии ДНР научно-техническая задача** обоснования параметров слоя высокоофлюсованной аглошихты, подготовки практических рекомендаций по проектированию усовершенствованной конструкции загрузочного устройства и совершенствованию на этой основе технологии загрузки шихты на агломашину, направленной на повышение прочности высокоосновного агломерата, снижение расхода твёрдого топлива на процесс спекания, повышение стойкости и срока службы паллет агломашин, а также улучшение экологической ситуации в зоне расположения агломерационного цеха.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем.

1. Анализ научно-технической информации позволил заключить, что одно из направлений улучшения показателей производства высокоосновного агломерата – это совершенствование технологии формирования слоя шихты на агломашине. Его реализация позволяет снизить содержание в агломерате фракции менее 5 мм, уменьшить расход твёрдого топлива, сократить техногенную нагрузку на окружающую среду, улучшить условия для службы паллет.

2. Обоснованы рациональные параметры формируемого на агломашине слоя высокоофлюсованной шихты:

- высота спекаемого слоя должна быть 350-380 мм в центральной зоне паллеты шириной около 800 мм при плавном увеличении высоты до 400-430 мм к бортам;

- близкое к линейному увеличение крупности загружаемой шихты от верхнего к нижнему горизонтам слоя; массовая доля классов 5-7 мм в исходной шихте 7-10%, что необходимо для формирования слоя естественной постели толщиной 30-40 мм;

- близкое к линейному распределение в шихте основности и горючего угле-

рода от максимальных значений вверху до минимальных внизу слоя для достижения рациональных температурно-тепловых и газодинамических условий спекания;

- близкая по величине по высоте и ширине слоя насыпная плотность шихты на уровне  $1800 \text{ кг/м}^3$  для достижения условий, способствующих повышению прочности верхней части спека.

3. Показано, что при перегрузке шихты из барабана-окомкователя в центр загрузочной воронки в ней формируется слой с поверхностью, напоминающей в продольном по ширине воронки сечении выпуклую параболу, по ветвям которой происходит сегрегация шихты. В результате газодинамическое сопротивление периферийных слоев шихты минимум на 12-15% ниже, по сравнению с центральной зоной. Такая структура слоя синхронно передается на агломашину и является причиной ускоренного спекания шихты прибортовых слоев, превращения соответствующих спеков в источник вредных прососов воздуха, замедления общей скорости спекания шихты и снижения производительности агломашин.

4. Увеличение основности шихты на 1,0-1,5 абс. ед. от 1,3-1,4 абс.ед. изменяет сегрегационные процессы в слое. Показано, что в связи с повышением в шихте содержания мелких фракций известняка степень сегрегации топлива в верхние горизонты слоя, сформированного на агломашине, возрастает на 0,2-0,3% (абс.).

5. Предложен частично опробованный на практике способ регулирования (выравнивания) скорости спекания шихты по ширине агломашины путём придания профилю слоя такой формы, которая соответствует кривой, характеризующей изменение газодинамического сопротивления слоя шихты по ширине загрузочной воронки. Это увеличение высоты спекаемого слоя в соответствии с технологическим регламентом, по которому незаглаженная поверхность слоя на паллетах напоминает вогнутую параболу, а также повышение насыпной плотности верхних горизонтов слоя, преимущественно периферийных зон, на  $150-160 \text{ кг/м}^3$ . Благодаря этому достигается снижение вертикальной скорости спекания в периферийных зонах агломашины на 5,0-5,5 мм/мин. Сочетание указанных мер в совокупности с

увеличением выхода годного продукта из спека может обеспечить повышение производительности агломашин на 7-10%, сокращение содержания фракции менее 5 мм в агломерате на 1-2% (абс.), снижение расхода коксика на 3-5 кг/т агломерата.

6. Обосновано, что при аномально низкой скорости спекания шихты 8-9 мм/мин в условиях ЕМЗ содержание фракции менее 5 мм в агломерате основностью 2-5 абс. ед. может достигать 12,8-17,5%.

7. Предложена конструкция загрузочного комплекса шихты для формирования на агломашине слоя с рациональными параметрами. Предусмотрено оснащение барабана-окомкователя направляющими элементами, а загрузочной воронки – качающимся распределителем шихты; применение усовершенствованного двухступенчатого загрузочного лотка и секционной гладилки с автономными утяжеленными периферийными секциями.

8. Практические рекомендации по проектированию загрузочного комплекса и совершенствования на его основе технологии загрузки и спекания высокоофлюсованной шихты переданы ЕМЗ. Ожидаемый экономический эффект составляет 11,35 млн. руб./год при долевом участии соискателя 5% или 567,5 тыс. руб.

Научные результаты используются в курсе «Технология подготовки железорудного сырья» при подготовке магистров по направлению подготовки 22.04.02 «Металлургия», магистерская программа «Металлургия чугуна».

9. Результаты, полученные в диссертационной работе, перспективны для дальнейшего совершенствования технологии производства высокоосновных агломератов, в том числе при повышенном содержании в шихте металлургических отходов, что актуально при существующем дефиците железорудного сырья.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Мищенко, И.М. Черная металлургия и охрана окружающей среды: учебное пособие. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2013 – 452с.
2. Ярошевский, С.Л. Качество шихты доменных печей, работающих с применением пылеугольного топлива / С.Л. Ярошевский, Н.С. Хлапонин // Металлургические процессы и оборудование. – 2008. – № 2. – С. 12-15.
3. Большаков, В.И. Современные тенденции развития доменного производства // Металлургическая и горнорудная промышленность, 2006. – № 2. – С. 6-12.
4. Особенности технологии доменной плавки с применением пылеугольного топлива / Н.М. Можаренко [и др.] // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2017. – № 5. – С. 2-9.
5. Вегман, Е.Ф. Краткий справочник доменщика. – Москва: Металлургия, 1981. – 240 с.
6. Мищенко, И.М. Состояние и перспективы развития агломерационного производства горно-металлургических предприятий Украины / И.М. Мищенко, Я.Ю. Асламова // Металлургические процессы и оборудование. – 2012. – №4. – С. 19-29.
7. Состояние и перспективы развития технологии производства агломерата. Часть 10. Борьба с вредными выбросами агломерационных фабрик. Текущие выбросы агломерационных фабрик / Ю.А. Фролов, Л.И. Каплун, И.М. Мищенко, Я.Ю. Асламова // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2018. – №1. – С.37-48.
8. Инженерно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. ИТС 26-2017. Производство чугуна, стали и ферросплавов. – Москва: Бюро НДТ, 2017. – 478 с.
9. Ефименко, Г.Г. Доменное производство Украины и передовых промышленных стран мира – состояние, проблемы, перспективы развития / Г.Г. Ефименко

ко, В.Г. Черный // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2007. – № 6. – С. 7-13.

10. Мищенко, И.М. Направление развития агломерационного производства Украины / И.М. Мищенко, Н.С. Хлапонин, Н.Г. Шаповалова // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2006. – №2. – С. 12-16.

11. Коршиков, Г. В. Формирование структуры слоя шихты и спека на агломашине АКМ-312 при различных способах загрузки / Г.В. Коршиков, М.А. Хайков, А.С. Кузнецов // *Сталь*. – 1996. – №11 – С.3-8.

12. Коршиков, Г.В. Газопроницаемость слоя шихты на агломашине с площадью спекания 252 м<sup>2</sup> при различных способах загрузки / Г.В. Коршиков, С.И. Шаров, В.П. Хайдуков // *Сталь*. – 1970. – №9. – С. 772-776.

13. Ishinawa, I. Two-layer sintering of the mixture on an sinter machine in Wakamatsu // *Tetsu-to-hagane = Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*. – 1982. – Vol. 68. № 11. – P. 4.

14. Опыт работы агломашин при однослойной загрузке шихты / В.П. Невраев [и др.] // *Металлург*. – 2006. – № 6. – С. 33-37.

15. Формирование структуры слоя при однослойной и двухслойной загрузке шихты на аглоленту / Г.В. Коршиков [и др.] // *Теплотехника и газодинамика агломерационного процесса*. – Киев: Наукова думка, 1983. – С. 22-25.

16. А.с. 637441 СССР, МПК С 22 В 1/14. Способ подготовки шихты к спеканию / Г.Г. Ефименко [и др.] (СССР). – 2473451/22-02; заявлено 28.03.77; опубл. 15.12.78, Бюл. № 46. – 2 с.

17. Фролов, Ю.А. Агломерация: технология, теплотехника, управление, экология. – Москва : *Металлургиздат*, 2016. – 672 с.

18. Коротич, В.И. О выделении постели при агломерации железных руд // *Металлург*. – 1963. – № 7. – С. 6-8.

19. Формирование слоя агломерационной шихты перед спеканием / А.А. Готовцев [и др.] // *Сталь*. – 1981. – № 12. – С. 11–15.

20. Безверхий, И.В. Исследование влияния интенсифицирующих факторов на показатели процесса агломерации / И.В. Безверхий, А.А. Томаш // Сб. науч. тр. ДонГТУ. – Алчевск: ДонГТУ, 2009. – Вып. 28. – С. 185-194.

21. Петрушов, С.Н. Формирование структуры агломерационного слоя шихты / С.Н. Петрушов, А.М. Новохатский // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1998. – № 8. – С. 21-24.

22. Гугис, Н. Н. О необходимости регулирования крупности твердого топлива при спекании руд и концентратов // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1990. – № 11. – С. 8-10.

23. Определение рационального режима работы челноковых распределителей агломерационной шихты / В.И. Коротич [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 1969. – № 17. – С. 71-72.

24. Оптимизация работы челнокового распределителя узла загрузки шихты на агломерационную машину / Л.И. Полоцкий [и др.] // Творческое наследие Б.И. Китаева: труды межд. науч.- практ. конф., 11-14 февраля 2009 г., Екатеринбург. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. – С. 187-192.

25. Усовершенствованная система загрузки шихты на агломашину АКМ-312 / Ю.А. Фролов [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 1987. – № 22. – С. 30-33.

26. Фролов, Ю.А. Анализ газодинамической работы агломерационных машин // Сталь. – 2005. – № 6. – С. 42-51.

27. Фролов, Ю.А. Метод газодинамического расчета сети агломерационной машины для реконструкции и проектирования / Ю.А. Фролов, Г.Н. Бездежский. Б.М. Баранбаев // Цветная металлургия. – 2002. – № 8-9. – С. 59-70.

28. Повышение качества агломерата за счет улучшения условий загрузки агломашин / Ю.С. Кравец и [др.] // Металлургия и коксохимия. – 1977. – Выпуск 53. – С. 14-19.

29. Наблюдение за работой агломерационных машин / Т. Хаук [и др.] // Черные металлы – 2003. – № 10. – С. 25-29.



30. Русанов, И.Ф. Влияние гранулометрического состава полифракционного сыпучего материала на газодинамическое сопротивление слоя / И.Ф. Русанов, Н.И. Русанова // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ДонГТУ, 2016. – Вып. 47. – С. 69–73.

31. Mitra, S. A process model for uniform transverse distribution in a sinter plant // Steel Time International. – 2005. – 29. 5. – P. 17-18.

32. Спекание агломерата с вводом в прибортовой слой чугуной стружки / С.Н. Петрушов [и др.] // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. - Алчевск: ДонГТУ, 2011. – Вып. 34. – С. 99-105.

33. Русанов, И.Ф. Оценка условий спекания агломерата у бортов спекательных тележек конвейерных агломашин / И.Ф. Русанов, С.В. Куберский, Д.В. Лупанов // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ДонГТУ, 2019. – Вып. 56. – С. 49-54.

34. Фролов, Ю.А. Состояние перспективы развития технологии производства агломерата. Часть 3. Загрузка шихты и постели на агломерационную машину // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2017. – № 6. – С. 22-31.

35. Фролов, Ю.А. Исследование процесса агломерации с использованием информации новой АСУ ТП агломерационной машины АКМ-312 ОАО «НЛМК» // Сталь. – 2010. – № 5. – С. 24-29.

36. Плотніков, В.В. Інтенсифікація агломераційного процесу за рахунок вдосконалення технології комбінованого огрудкування і завантаження шихти / В.В. Плотніков, Л.Н. Саїтгарєєв // Вісник Приазовського державного технічного університету. – Маріуполь: ПДТУ, 2012. – Вип. 25. – С. 41-46. (сер.: технічні науки).

37. Development of Heat-pattern Control System along the Width Direction of Sintering Bed / Ryuichi Nakajima [et. al.] // Tetsu-to-hagane = Journal of the Iron and Steel Institute of Japan. – 1990. – V. 76. № 6. – P. 825-831.

38. Оценка сегрегации шихты / А.А. Готовцев [и др.] // Сталь. – 1978. – № 12. – С. 14-15.

39. А.с. 1125459 СССР, МПК F 27 В 21/06. Устройство для загрузки шихты на конвейерную агломерационную машину / Ю.А. Фролов [и др.] (СССР). – 3617397/22-02; заявлено 11.07.83; опубл. 23.11.84, Бюл. 43.

40. Бернштейн, Р.С. Применение вибропитателя для загрузки агломерационных машин / Р. С. Бернштейн, Ю. А. Фролов // *Металлург.* – 1977. – № 7. – С. 12-13.

41. Берштейн, Р.С. Оптимальная технология спекания шихты в высоком слое / Р. С. Бернштейн, Ю. А. Фролов // *Металлург* – 1976. – № 7. - С. 12-13.

42. А.с. 1048284 СССР, МПК F 27 В 21/06. Загрузочное устройство конвейерной агломерационной машины / Н.С. Хлапонин [и др.] (СССР) .- 3413434/22-02; заявлено 31.03.82; опубл. 15.10.83, Бюл. 38.

43. Комбинированное окомкование агломерационной шихты в аппаратах барабанного типа и тарельчатых грануляторах / Г.Е. Исаенко [и др.] // *Сталь.* – 2009. – № 8. – С. 2-7.

44. Пазюк, М.Ю. Управление процессом формирования слоя агломерационной шихты // *Известия ВУЗов. Черная металлургия.* – 1985. – № 10. – С. 131-134.

45. Frolov, Y.A. Reconstruction of the Arcelormittal Temirtau Metallurgical Combine Sinter Line of Sintering Machine АКМ-312/336 Part 1. / Y.A. Frolov, M.F. Vitushchenko // *Metallurgist.* – 2017. – Vol. 60. – P.1139-1148.

46. Совершенствование загрузочных устройств агломерационных машин в Японии // *Новости черной металлургии за рубежом* – 2002. – № 3. – С. 41-43 .

47. А.с. 83288 СССР, МПК F 27 В 21/06, С 22 В 1/16. Загрузочное устройство агломерационной машины / Ю.С. Кравец [и др.] (СССР) .- –2833117/22-02; заявлено 18.10.79; опубл. 23.05.81, Бюл.19.

48. А.с. 1444606 СССР, МПК F 27 В 21/06. Устройство для загрузки шихты на спекательные тележки / Ю.А. Фролов [и др.] (СССР). – 4179038/23-02; заявлено 09.01.87; опубл. 15.12.88, Бюл.46. – С. 3.

49. А.с. 1518397 СССР, МПК С 22 В 1/20. Способ загрузки агломерационной шихты на спекательные тележки / Ю.А. Фролов [и др.] (СССР). – 4318055/23-02; заявлено 16.10.87; опубл. 30.10.89, Бюл. 40. – С. 2.

50. А.с. 1668837 СССР, МПК F 27 В 21/10, С 22 В 1/24. Устройство для подготовки шихты к спеканию / А.З. Крижевский [и др.] (СССР). – 4637804/-02; заявлено 21.11.88; опубл. 0.08.91, Бюл. 29. – 4 с.

51. А.с. 2003935 С1 РФ, МПК F 27 В 21/10. Устройство для загрузки шихты на спекательные тележки агломерационной машины / Ю.А. Фролов [и др.] (РФ). – 5046135/-02; заявлено 05.06.92; опубл. 30.11.93, Бюл. 43-44. – С. 5.

52. Пат. 2169 Республика Казахстан, МПК F 27 В 21/10. Устройство для загрузки агломерационной шихты на спекательные тележки / Ю.А. Фролов [и др.]; заявитель и патентообладатель Карагандинский металлургический комбинат. – № 5041511/02; заявлено 15.06.93; опубл. 15.06.95, Бюл. № 2. – 4 с.

53. Пат. 2335658 РФ, МПК F 27 В 21/10. Загрузочное устройство для ленточной агломерационной машины / О. Паммер [и др.] (РФ); заявитель и патентообладатель Сименс ФАИ Металз Текнолоджиз ГМБХ УНД Ко. – № 2007107613/02; заявлено 12.07.2005; опубл. 10.12.2009, Бюл. № 34. 11 с.

54. Пат. 42105 Украина, МПК F 27 В 21/06, С 22 В 1/16 (2009.01) Завантажувальний пристрій конвеєрної агломераційної машини / І.А. Овчинникова [та інші] (Україна); заявник та патентотримач Запорізький нац. техн. Університет. - Заявл. 05.01.2009; опубл. 25.06.2009, Бюл. №12.

55. Пат. 126441 РФ, МПК F27В 21/10 Загрузочное устройство для агломерационной машины / К.В. Филенков [и др.] (РФ); патентообладатель ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК». – Заявл. 01.11.2012; опубл. 27.03.2013. – Бюл. № 9.

56. Блинов, А.М. Совершенствование загрузочного устройства агломерационной машины позволяющее снизить вредные бортовые прососы / А.М. Блинов, Г.Н. Попов // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ДонГТУ, 2013. – Вып. 39. – С. 152-156.

57. Усовершенствованная система управления загрузкой шихты на агломашину // Новости черной металлургии за рубежом. – 2006. – № 3. – С. 32-33.

58. Пат. 44116 Украина, МПК F 27 В 21/00. Пристрій для завантаження шихти на агломераційну машину / Рудь Ю.С., Кучер В.Г. (Україна); заявник та

патентотримач Криворізький техн. Університет. – Заявл. 03.02.2009; опубл. 25.09.2009, Бюл. №18.

59. Пат. 79892 Україна, МПК F 27 В 21/10, С 22 В 1/20. Пристрій для завантаження шихти на аглострічку / О.В. Воробйов, О.А. Томаш, І.В. Безверхій (Україна); заявник та патентотримач Приазовський держ. техн. Університет. – Заявл. 05.12.2005; опубл. 25.07.2007, Бюл. №11.

60. Пат. 113631 Україна, МПК F 27 В 21/00. Пристрій для завантаження шихти на колосникові грати рухомих візків агломераційної машини / В.С. Рудь, В.Г. Кучер, В.Ю. Білоножко (Україна); заявник та патентотримач Криворізький національний. Університет. – Заявл. 08.07.2016; опубл. 10.02.2017, Бюл. №3.

61. А.с. 1749670 СССР, МПК F 27 В 21/10. Загрузочное устройство агломерационной машины / Н.В. Панишев [и др.] (СССР). – 4877784/02; заявлено 17.09.90; опубл. 23.07.92, Бюл. 27.

62. Пат. 2089806 РФ, МПК F27B21/10 Устройство для загрузки обжиговой конвейерной машины / Л.К. Кокорин, Ю.Д. Флягин (РФ); патентообладатель АО «Уральский завод тяжелого машиностроения». – Заявл. 02.03.1994; опубл. 10.09.1997. — 5 с.

63. Пат. 2007678 РФ, МПК F27 В21/00. Устройство для выравнивания слоя шихты на паллетах агломашины / И.К. Борискин [и др.] (РФ); заявитель и патентообладатель Сибирский металлургический институт им. С. Орджоникидзе. – № 2007107613/02; заявл. 22.11.1990; опубл. 15.02.2009, 1994. – Бюл. № 34.

64. Пат. 85269 Україна, МПК F 27 В 21/06, С 22 В 1/20, F 27 В 21/10, F 27 D 3/00. Живильний пристрій для агломераційної машини конвеєрного типу і спосіб подачі агломераційної шихти / К. Лабер, О. Паммер, Х. Стіасні (Україна); заявитель и патентообладатель Сіменз ВАІ Металз Текнолоджіс ГМБХ Енд Ко. – № а200702142; заявл. 12.07.2005; опубл. 12.01.2009, 1994. – Бюл. № 1.

65. Мищенко, И.М. Совершенствование технологии и оборудования агломерационного производства / И.М Мищенко, В.В. Кочура, Я.Ю. Асламова [и др.] // Металлургические процессы и оборудование – 2011. – № 3. – С. 35-44.

66. Ендияров, С.В. Математическое моделирование и оптимизация конструкции магнитной сегрегационной плиты для агломерационных производств / С.В. Ендияров, М.Ю. Коновалов // Сталь. – 2016. – № 1. – С.8-11.

67. Selvam, S.T. An Innovative Magnetic Charging Chute to Improve Productivity of Sinter Machine at Rourkela Steel Plant / S.T. Selvam, C. Subhasis, A. Das // Physics Procedia. – 2014. – Vol. 54. – P. 180-184.

68. Петрушов, С.Н. Современный агломерационный процесс: монография. – Алчевск: ДонГТУ, 2006. – 357 с.

69. Исследование сегрегации агломерационных шихт / Ю.А. Фролов [и др.] // Сталь. – 1974. – № 10. – С. 883-886.

70. Исследование и совершенствование укладки шихты на агломашину / С.Н. Петрушов [и др.] // Теплотехника и газодинамика агломерационного процесса. – Киев: Наукова думка, 1983. – С. 29-33.

71. Фролов, Ю.А. Теплотехнические аспекты процесса агломерации // Сталь. – 2003. – № 12. – С. 2-11.

72. Безверхий, И.В. Исследование влияния сегрегации аглошихты на показатели процесса ее спекания // Вісник Приазовського державного технічного університету. – Мариуполь: ПГТУ, 2007. - Вип. 17. – С. 23-25.

73. Русаков, П.Г. Исследование закономерностей распределения неоднородного сыпучего материала по откосу / П.Г. Русаков, И.Ф. Русанов, В.Г. Мороз // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1985. – № 6. – С.15-18.

74. Вегман, Е.Ф. Теория и технология агломерации. – Москва: Металлургия, 1974. – 288с.

75. Коротич В.И. Основы теории и технологии подготовки сырья к доменной плавке. – Москва: Металлургия, 1978. – 208 с.

76. Сигов, А.А. Агломерационный процесс / А.А. Сигов, В.А. Шурхал. – К.: Техніка, 1969. – 232 с.

77. Пат. 109978 Україна, МПК В65G 65/00 F 27 В 21/00. Спосіб завантаження шихти на колосникові грати агломераційної машини / Ю.С. Рудь, В.Г. Кучер (Україна). – и 2016 00997; заявл. 08.02.20016; опубл. 26.09.82016, Бюл. №18.

78. Типовая технологическая инструкция по производству офлюсованного доменного агломерата / ТИ-2.5-08-01-87. – Свердловск: Уралмеханобр, 1987. – 28 с.

79. Производство агломерата. Технологическая инструкция. ТИ 235-А-01-2018. – Енакиево: Филиал № 2 «ЕМЗ» ЗАО «ВТС», 2018. – 70 с.

80. Исследование факторов, определяющих начальную газопроницаемость агломерационной шихты / П.А. Половой [и др.] // Metallurg. – 1982. – № 4. – С. 18-20.

81. Коршиков, Г.В. Влияние строения структурных элементов агломерационной шихты на газодинамическую характеристику спекаемого слоя / Г.В. Коршиков, М.А. Хайков, Н.Н. Должикова // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1983. – №6. – С.12-15.

82. Томаш, А. А. Новый подход при расчете перепада давления газа в бинарном зернистом слое // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1997. – №8. – С.16-18.

83. Мных, А.С. Анализ адекватности конечно-элементной модели процесса агломерации железной руды / А.С. Мных, М.Ю. Пазюк, И.Н. Мных // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. – № 1/1 (21). – С. 22-25.

84. Сальников, И.М. Анализ методов оценки неоднородностей структуры слоя шихт / И.М. Сальников, В.И. Тихонов, М.Ю. Пазюк // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1981. – С. 13-15.

85. Мных, А.С. Оптимизация структуры слоя агломерационной шихты с целью стабилизации теплового режима процесса спекания / А.С. Мных, И.Г. Яковлева, М.Ю. Пазюк // Металлургическая и горнорудная промышленность – 2016. – № 2. – С. 43- 48.

86. Мных, А.С. Исследование динамики процесса формирования слоя аглошихты, подготовленной к тепловой обработке // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. – №2. – С. 23-28.

87. Анализ методов исследования сегрегационных процессов в агломерационной шихте / В.И. Пожуев [и др.] // Збірник наукових праць «Металургія». – Запорожье: ЗГИА, 2009. – Вып. 20. – С. 5-13.

88. Druet, I. Medelisation de la segregation granulometrique lors du chargement des chales d'aggregation // Revue metallurgie. – 1984. - №2. – P. 89-99.

89. Изучение распределения гранул окомкованной шихты при загрузке на спекательные тележки / А. А. Вовк [и др.] // Металлургия и коксохимия. – 1982. – Выпуск 75. – С. 8-11.

90. Matsumura, T. Development of new feeding equipment for controlling charge segregation of sinter feed / T. Matsumura, S. Amano, H. Asahara // Current Advances in Materials and Processes. – 1999. – № 4. – P.766.

91. Ефименко, Г.Г. Металлургия чугуна / Г.Г. Ефименко, А.А. Гиммельфарб, В.Е. Левченко. – Киев: Выща школа Головное изд-во, 1988. – 351 с.

92. Коротич, В.И. Теоретические основы окомкования железорудных материалов. – Москва: Металлургия, 1966. – 150 с.

93. Коротич, В.И. К расчету газодинамических параметров агломерационного процесса / В.И. Коротич, В.П. Пузанов. // Сталь. – 1967. – №7. – С. 583-587.

94. Sasaki, S. Segregation of sinter charge when feeding to sinter machine / S. Sasaki, E. Ogra // Tetsu-to-hagane = Journal of the Iron and Steel Institute of Japan. – 1980. – V. 66. – №4. – P. 86.

95. Saint, N. Segregation of sinter charge when feeding to sinter machine / N. Sainty, S. Kinishi, I. Izzy // Tetsu-to-hagane = Journal of the Iron and Steel Institute of Japan. – 1980. – V. 66. – №4. – P. 87.

96. Влияние параметров загрузочного устройства агломерационной машины на распределение топлива по высоте слоя шихты на аглоленте / В.И. Пожуев, М.Ю. [и др.] // Збірник наукових праць «Металургія». – Запорожье: ЗГИА, – 2009. – Вып. 19. – С. 5-11.

97. Пазюк, М.Ю. Моделирование закономерностей распределения фракций агломерационной шихты по высоте слоя // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1987. – №4. – С. 142-145.

98. Илюхин, А.Я. Развитие технологии загрузки шихты на агломерационные машины / А.Я. Илюхин, И.А. Овчинникова // *Металл и литье Украины*. – 2007. – № 9-10. – С. 3-11.

99. Пазюк, М. Ю. Исследование сегрегации топлива в слое шихты / М.Ю. Пазюк, В.И. Гранковский // *Известия ВУЗов. Черная металлургия*. – 1982. – №12. – С. 6-8.

100. Базилевич, С.В. Интенсификация агломерационного процесса и улучшение качества агломерата при спекании тонкоизмельченных концентратов // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. – 1975. – № 24. – С. 16-23.

101. Готовцев, А.А. Оценка сегрегации агломерационной шихты / П.А. Готовцев, И.М. Сальников, В.И. Тихонов // *Теоретические основы и технология подготовки металлургического сырья к доменной плавке: респ. научн.-технич. конф.: тезисы докл.* – Днепропетровск, 1980. – С. 29-30.

102. Ли, А.М. Совершенствование загрузки шихты на агломерационную машину / А.М. Ли, М.Ф. Витушенко, Ю.А. Кабанов // *Металлург*. – 1984. – №3. – С. 12-14.

103. Кухарь, А.С. Производство и качество агломерата. – Москва: Металлургия, 1977. – 55 с.

104. Исследование стабильности подачи шихты на конвейерные машины / М.Ю. Пазюк [и др.] // *Известия ВУЗов. Черная металлургия*. – 1989. – №3. – С. 23-27.

105. Исследование процесса агломерации для модернизации агломерационной фабрики № 2 ОАО «ЧМК» с охлаждением агломерата на агломерационных машинах / Ю.А. Фролов [и др.] // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. – 2010. – № 2. – С. 8-17.

106. Ефимов, С. П. Влияние крупности топлива на процесс агломерации и качество агломерата / С.П. Ефимов, Г.Г. Ефименко // *Известия ВУЗов. Черная металлургия*. – 1970. – № 9. – С. 21-25.



107. Мищенко, И.М. Технология подготовки сырья для доменной плавки / И.М. Мищенко, Я.Ю. Асламова. – Донецк: ДонНТУ, 2013. – 277 с.
108. А.с. 1770708 СССР, МПК F 27 В 21/08. Устройство для выравнивания слоя шихты на паллетах агломашин / М.Т. Гаприндашвили [и др.] (СССР). – 4793815/02; заявлено 25.12.89; опубл. 23.10.92, Бюл. 39.
109. А.с. 1180394 СССР, МПК С 22 В 1/16. Способ формирования слоя аглошихты на спекательных тележках / Л.К. Герасимов [и др.] (СССР). – 3652156/22-02; заявлено 14.10.83; опубл. 23.09.85, Бюл. 35.
110. Пат. 139693 РФ, МПК F 27 В 21/06. Агломерационная машина конвейерного типа / В.Н. Бодрых [и др.]; заявитель и патентообладатель ОАО «НЛМК». – № 2013121456/02; заявл. 04.05.2013; опубл. 20.04. 2014. – Бюл. № 11.
111. Пат. 104727 Україна, МПК С 21 В 13/00, С 22 В 1/16, С 22 В 1/20, F 27 В 9/18. Пристрій для вирівнювання поверхні агломераційної шихти у гратчастому спікальному візку / Г. Баровські (DE); заявитель и патентообладатель ОУТОТЕК ОЙЙ, Riihitontuntie 7, FIN-02200 Espoo, Finland (FI). – № ф 201102384; заявл. 15.09.2009; опубл. 10.06.2011. – Бюл. № 11.
112. Повышение качества агломерата за счёт улучшения условий загрузки агломашин / Ю.С. Кравец [и др.] // *Металлургия и коксохимия*. – 1977. – Выпуск 53. – С. 14-19.
113. Парфенов, А.М. Основы агломерации железных руд. – Москва: Издат. лит.-ры по черной и цветной металлургии. – 1961. – 318 с.
114. Кассим, Д.А. Влияние качества агломерата на технико-экономические показатели доменной плавки // *Гірничий вісник*. – 2014. – Вип. 97. – С. 86-90.
115. Нечкин, Г.А. Оптимизация доменной шихты по комплексу металлургических свойств / Г.А. Нечкин, Д.А. Чернавин, Г.Е. Исаенко // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. – 2019 – № 11. – С. 1244-1250.
116. Утков, В.А. Высокоосновный агломерат. – Москва: Металлургия, 1977. – 156 с.

117. Колесанов, Ф.Ф. Совершенствование агломерационного процесса / Ф.Ф. Колесанов [и др.]. – Киев: Техніка, 1983. – 110 с.

118. Влияние качества исходного сырья на прочность высокоосновного агломерата / В.А. Утков [и др.] // Обогащение руд. – 1963. – № 5. – С.33-38.

119. Предупреждение залипания колосников спекательных тележек агломерационных машин / И.М. Мищенко [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 1985. – №10. – С. 47-49.

120. Кривенко, С.В. Структура агломератов различной основности / С.В. Кривенко, Г.Г. Божков // Вісник приазовського державного технічного університету. – Мариуполь: ПГТУ, 2014. – Вип. 28. – С. 31-37.

121. Тарасов, В.П. Свойства агломератов разной основности / В.П. Тарасов, С.В. Кривенко, Г.Г. Божков // Сталь. – 2015. – № 1. – С.2-5.

122. Малышева, Т.Я. Механизм минералообразования и металлургические свойства агломератов основности 1,1-3,1 в условиях ММК / Т.Я. Малышева, Ю.С. Юсфин, Н.Р. Мансурова // Сталь. – 2007. – № 2. – С.19-22.

123. Мансурова, Н.Р. Влияние генезиса и основности шихты на минералогический состав и металлургические свойства агломерата: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.02 / Мансурова Наталья Рамилевна. – Москва, 2007. – 26 с.

124. Курунов, И.Ф. Состояние и развитие доменного производства Китая, Японии, Северной Америки, Западной Европы и России (по материалам Пятого международного конгресса по теории и технологии производства чугуна) // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2010. – № 3. – С. 32-49.

125. Опыт производства высокоосновного агломерата на фирме Tata Steel // Новости черной металлургии за рубежом. – 2006. – № 4. – С. 30–32.

126. Технология подготовки шламов и известковой пыли конвертерного производства / Е.И. Перлухин [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 1986. – № 17. – С.43-44.

127. Технология подготовки и агломерации железосодержащих отходов металлургического производства / В.И. Ростовский [и др.] // Сталь. – 1980. – № 1. – С. 4-7.

128. Ростовский, В.И. Опыт освоения технологии утилизации пылей и шламов конвертерного производства / В.И. Ростовский, А.В. Кравченко, М.М. Перистый // Сотрудничество для решения проблемы отходов: труды 1-ой Международной конференции, 5-6 февраля 2004 г., Харьков. – Харьков: Независимое агентство экологической информации, 2004. – С. 117-119.

129. Агломерация шихт с большим содержанием шламов на фабриках Украины / И.М. Мищенко [и др.] // Производство чугуна на рубеже столетий: труды V международного конгресса доменщиков, 07-12.06.1999, г. Днепропетровск-Кривой Рог (Украина). – Днепропетровск: Пороги, 1999. – С. 106-110.

130. Лукьянов, А.В. Эффективная работа аглодоменного производства филиала № 2 ЕМЗ ЗАО “Внешторгсервис” при расширении использования в шихте вторичных ресурсов и окатышей / А.В. Лукьянов, А.В. Зубенко, В.В. Ивасенко // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ДонГТУ, 2017. – № 7. – С. 86-91.

131. Дембицкий, Ю.В. Технология использования в агломерационной шихте частично подготовленных шламов металлургического производства / Ю.В. Дембицкий, Н.Т. Демура, В.П. Падалка // Металл и литье Украины. – 1997. – №6-7. – С. 9-10.

132. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – Москва: ООО ТИД «Альянс», 2004. – 753 с.

133. Анализ влияния компонентного и химического составов агломерационной шихты на качество агломерата и производительность агломерационных машин ОАО «ЧМК» / Ю.А. Фролов [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2012. – № 10. – С. 37-44.

134. Васнев, С.А. Статистика: Учебное пособие. – Москва: МГУП, 2001. – 170с.

135. Фролов, Ю.А. Состояние и перспективы развития технологии производства агломерата. Часть 5. Газодинамическая работа агломерационных машин / Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2017. – № 8. – С. 21-32.

136. Обоснование рациональных параметров слоя высокоофлюсованной шихты, формируемого на паллетах агломерационной машины / И.М. Мищенко, Я.Ю. Асламова, А.В. Кузин Н.Н. Коробкин, А.В. Полохин // Вестник ДОННТУ. – 2020. – № 1 – С. 35-44.

137. Технология производства высокоосновного агломерата в агломерационном цехе Енакиевского металлургического завода и возможные способы ее совершенствования / И.М. Мищенко, Я.Ю. Асламова, Н.С. Хлапонин [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2020. – № 8 – С. 790-802.

138. Базилевич, С.В. Агломерация / С.В. Базилевич, Е.Ф. Вегман. – Москва: Металлургия, 1974. – 368 с.

139. Теплотехника окускования железорудного сырья / С.Г. Братчиков [и др.]. – Москва: Металлургия, 1970. – 343 с.

140. Опыт производства высокоофлюсованного агломерата на агломерационной фабрике Енакиевского металлургического завода / И.М. Мищенко, Я.Ю. Асламова, А.М. Кузнецов [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2018. – №12. – С. 33-45.

141. Клягин, Г.С. Технология и оборудование для подготовки агломерационных шихт с повышенным содержанием заскладированных шламов / Г.С. Клягин, В.И. Ростовский, Я.Ю. Пономарева // Прогресивні технології і системи машинобудування. – 2005. – № 1. – С. 111-120.

142. Коршиков, Г.В. Энциклопедический словарь-справочник по металлургии. – Липецк: Липецкое издательство Госкомпечати РФ, 1998. – 781с.

143. Утков, В.А. Моделирование зависимости прочности агломератов от их основности / В.А. Утков, О.В. Зырянова // Журнал прикладной химии. – 2013. – Т.86. № 3. – С. 336-339.

144. Трушко, В.Л. Разработка импортозамещающих технологий повышения производительности агломерационных машин и прочности агломерата / В.Л. Трушко, В.А. Утков // Записки горного института. – 2016. – Т. 221. – С. 675-680.

145. Коротич, В.И. Газодинамика агломерационного процесса / В.И. Коротич, В.П. Пузанов. – Москва: Metallurgia, 1969. – 208 с.

146. Берснев, И.С. Разработка и исследование технологии агломерации гематитовых руд [Большетроицкого месторождения]: автореф. дис... канд. техн. наук:05.16.02 / Берснев Иван Сергеевич. – Екатеринбург, 2011. – 22 с.

147. Исследование влияния высоты слоя шихты на процесс агломерации / Ю.А. Фролов [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. - 2010. - № 10. – С.45-49.

148. Мищенко, И.М. Исследование и совершенствование технологии загрузки шихты на паллеты агломерационных машин / И. М. Мищенко, Я. Ю. Асламова, Н.Н. Коробкин [и др.] // Научно-технический прогресс в черной металлургии – 2019: Материалы IV Междунар. науч. конф. (Череповец, 18–20 сентября 2019 г.). – Череповец: ЧГУ, 2019. – С. 152-157.

149. Андоньев, С.М. Пылегазовые выбросы предприятий черной металлургии / С.М. Андоньев, О. В. Филиппьев. – Москва: Metallurgia, 1973. – 199 с.

150. Гугис, Н.Н. Развитие технологии агломерации и пути снижения вредных выбросов в атмосферу / Н.Н. Гугис, И.М. Мищенко // Обзорная инф. Сер. Защита воздушного и водного бассейнов от выбросов металлургических заводов. – Москва: ин-т «Черметинформация», 1989. – 39 с.

151. Рябова, Г.Н. Диоксины в черной металлургии Франции // Новости черной металлургии за рубежом. – 1999. – №. 4. – С. 127.

152. Еланский, Г.Н. Диоксины – экологическая опасность // Сталь. – 2000. – № 2. – С.82-86.

153. Remus, R. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production / R. Remus, M. A. Aguado-Monsonet, S. Roudier, L. Delgado

Sancho. – European Union : Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2013. – 627 p.

154. Фролов, Ю.А. Состояние и перспективы развития технологии производства агломерата. Часть 11. Технологические методы защиты окружающей среды от вредных выбросов агломерационных фабрик / Ю.А. Фролов, Л.И. Каплун, И.М. Мищенко, Я.Ю. Асламова // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2018. – № 2. – С. 17-31.

155. Фролов, Ю.А. Состояние и перспективы развития технологии производства агломерата. Часть 12. Технические средства защиты окружающей среды от вредных выбросов агломерационных фабрик / Ю.А. Фролов, Л.И. Каплун, И.М. Мищенко, Я.Ю. Асламова // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2018. – № 3. – С. 24-36.

156. Орелкина, Д.И. Газовые выбросы металлургических предприятий. Зоны влияния в приземных слоях атмосферы / Д.И. Орелкина [и др.] // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 4. – С. 1062-1068.

157. Папенов, К.В. Экономика природопользования. – Москва: ТЕИС, ТК Велби, – 2006. – 928 с.

158. Колесник, И.А. Проблемы ресурсосбережения в аглококсоменном производстве и пути их решения / И.А. Колесник, В.В. Кочура, Я.Ю. Асламова // Комплексное использование природных ресурсов: Сб. научн. тр. VIII Республиканской конференции (г. Донецк, 8 декабря 2016 г.) – Донецк: ДОННТУ, 2016. – С. 34-37.

## **Приложение А**

Документы, подтверждающие внедрение результатов диссертационной работы

**ФИЛИАЛ № 2**  
**«ЕНАКИЕВСКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ЗАВОД»**  
**ЗАКРЫТОГО АКЦИОНЕРНОГО ОБЩЕСТВА «ВНЕШТОРГСЕРВИС»**

Адрес (место нахождения): Донецкая Народная Республика, 86429, город Енакиево, проспект Metallургов, дом 9.

**Утверждаю:**

Директор по технологии и качеству

Филиал № 2 «Енакиевский металлургический завод»

ЗАО «Внешторгсервис»

Филиал № 2 Ф.М.А.В. Зубенко

« 29 » \_\_\_\_\_ 2020 г.



**СПРАВКА**

о передаче результатов исследований диссертационной работы  
Асламовой Яны Юрьевны на тему «Обоснование параметров слоя  
высокоофлюсованной шихты и технологии его формирования на агломерационной  
машине», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по  
специальности

05.16.02 – Металлургия чёрных, цветных и редких металлов (технические науки)

Филиалу № 2 «ЕМЗ» ЗАО «Внешторгсервис» переданы практические рекомендации для проектирования и дальнейшего совершенствования загрузочного комплекса и технологии загрузки шихты на паллеты агломерационной машины, разработанные на базе обоснованных в диссертационной работе Асламовой Я.Ю. рациональных параметров слоя высокоофлюсованной шихты, а также результатов, полученных при исследовании механизма его формирования в загрузочной воронке бесчелнокового комбинированного загрузочного устройства и на агломашине.

Элементы конструкции загрузочного комплекса позволяют регулировать скорость спекания высокоофлюсованной шихты и решить проблему неравномерного ее спекания по ширине агломашин за счет следующих изменений технологии загрузки шихты:

1. Монтаж в загрузочной воронке качающегося распределителя шихты и оснащение разгрузочного торца барабана-окомкователя направляющими элементами в виде сегментов способствует сглаживанию формы поверхности засыпи в загрузочной воронке, что минимизирует негативное влияние сегрегационных процессов в загрузочной воронке на формирование слоя на агломашине.

2. Замена электровибрационного питателя барабанным питателем диаметром 1200 мм, длиной 2570 мм; частотой вращения, регулируемой в диапазоне 0,4–6 мин<sup>-1</sup> улучшает

*Соответствует оригиналу  
Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 01.015.03*



*А.В. Зубенко*



сегрегацию шихты при загрузке ее на агломашину и выделение естественной постели, способствует снижению затрат электроэнергии на работу питателя, повышению производительности узла загрузки, упрощению контроля качества окомкования шихты, полноты загрузки слоя заданной высоты на агломашину.

3. Оснащение разгрузочной щели загрузочной воронки шиберной заслонкой с угловыми срезами высотой 50 мм и длиной 750 мм для выдачи больших порций шихты из пристеночных зон загрузочной воронки способствует формированию на паллетах слоя с высотой, увеличивающейся от центра к бортам паллеты.

4. Установка на выходе из разгрузочной щели загрузочной воронки зубчатого стабилизатора потока шихты шириной 150-250 мм под отрицательным углом наклона к горизонту в пределах 15-25° способствует равномерному поступлению шихты на загрузочный лоток.

5. Замена одноступенчатого загрузочного лотка двухступенчатым с приданием его второй ступени стреловидной конфигурации с вогнуто-параболической формой нижней кромки для подачи повышенного количества шихты к бортам паллеты гарантирует повышение газодинамического сопротивления прибортового слоя шихты, что способствует выравниванию скорости спекания по ширине агломашины.

6. Применения пятисекционной гладилки с автономными утяжеленными секциями, в конструкции которой предусмотрены элементы, позволяющие регулировать уплотняющее воздействие на зоны слоя, расположенные у бортов паллеты, обеспечивает рациональное увеличение объемной плотности верхних горизонтов слоя шихты на 150-170 кг/м<sup>3</sup>, благодаря чему сокращается удельный расход тепла на зажигание топлива шихты, снижается неравномерность спекания по ширине агломашины, повышается прочность агломерата.

Оснащение агломашин ЕМЗ загрузочным комплексом шихты предлагаемой конструкции позволит увеличить среднюю высоту спекаемого слоя на 50 мм, снизить содержание фракции 0-5 мм в агломерате на 1-2 % (абс.), уменьшить расход твердого топлива на процесс спекания на 3-5 кг/т агломерата, сократить выбросы вредных веществ в атмосферу на 12-15%, возможно повышение производительности агломашин на 7-10 %. Ожидаемый экономический эффект составляет 11,35 млн. руб./год.

Практические рекомендации для проектирования загрузочного комплекса шихты на паллеты агломерационной машины включены в технический проект модернизации агломерационного цеха.

Начальник агломерационного цеха



Н. Н. Коробкин

*Соответствует оригиналу  
Ученой секретарь  
диссертационного совета*



*А. В. Яковченко*



**ФИЛИАЛ № 2**  
**«ЕНАКИЕВСКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ЗАВОД»**  
**ЗАКРЫТОГО АКЦИОНЕРНОГО ОБЩЕСТВА «ВНЕШТОРГСЕРВИС»**

Адрес (место нахождения): Донецкая Народная Республика, 86429, город Енакиево, проспект Metallургов, дом 9.

Утверждаю:

Директор по технологии и качеству Филиал № 2

«Енакиевский металлургический завод»

ЗАО «Внешторгсервис»

А.В. Зубенко

« 10 » \_\_\_\_\_ 2020 г.

**РАСЧЕТ**

ожидаемого годового экономического эффекта от внедрения результатов исследований диссертационной работы Асламовой Яны Юрьевны на тему «Обоснование параметров слоя высокоофлюсованной шихты и технологии его формирования на агломерационной машине», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.02 – Металлургия чёрных, цветных и редких металлов (технические науки)

- Практические рекомендации для проектирования и совершенствования загрузочного комплекса и технологии загрузки шихты на паллеты агломерационной машины разработаны для условий агломерационного цеха филиала № 2 «ЕМЗ» ЗАО «Внешторгсервис» и включены в технический проект его модернизации.

Внедрение загрузочного комплекса гарантирует формирование на агломашине слоя высокоофлюсованной шихты с рациональными параметрами:

- высота слоя на агломашине в центральной зоне паллеты составляет не менее 350 мм и постепенно увеличивается к бортам до 400-420 мм, что обеспечивает стабилизацию газодинамического сопротивления шихты и, соответственно выравнивание скорости ее спекания по ширине слоя;

- технологически рациональное и стабильное во времени распределение по высоте слоя гранулометрического состава, основности, горючего углерода высокоофлюсованной шихты при обеспечении ее эффективной сегрегации по высоте слоя;

- объемная плотности шихты не менее 1800 кг/м<sup>3</sup>, регулируемое уплотнение верхней части слоя шихты с целью увеличения ее плотности до уровня плотности шихты средних по высоте слоя горизонтов.

*Соответствует оригиналу  
Учётный секретарь  
диссертационного совета Д 01.013.03*



*А.В. Зубенко*



Элементы конструкции загрузочного комплекса позволяют регулировать скорость спекания высокоофлюсованной шихты и решить проблему неравномерного ее спекания по ширине агломашины за счет следующих изменений технологии загрузки шихты:

1. Монтаж в загрузочной воронке качающегося распределителя шихты и оснащение разгрузочного торца барабана-окомкователя направляющими элементами в виде сегментов способствует сглаживанию формы поверхности засыпи в загрузочной воронке, что минимизирует негативное влияние сегрегационных процессов в загрузочной воронке на формирование слоя на агломашине.

2. Замена электровибрационного питателя барабанным питателем диаметром 1200 мм, длиной 2570 мм; частотой вращения, регулируемой в диапазоне 0,4-6 мин<sup>-1</sup> улучшает сегрегацию шихты при загрузке ее на агломашину и выделение естественной постели, способствует снижению затрат электроэнергии на работу питателя, повышению производительности узла загрузки, упрощению контроля качества окомкования шихты, полноты загрузки слоя заданной высоты на агломашину.

3. Оснащение разгрузочной щели загрузочной воронки шиберной заслонкой с угловыми срезами высотой 50 мм и длиной 750 мм для выдачи больших порций шихты из пристеночных зон загрузочной воронки способствует формированию на паллетах слоя с высотой, увеличивающейся от центра к бортам паллеты.

4. Установка на выходе из разгрузочной щели загрузочной воронки зубчатого стабилизатора потока шихты шириной 150-250 мм под отрицательным углом наклона к горизонту в пределах 15-25° способствует равномерному поступлению шихты на загрузочный лоток.

5. Замена одноступенчатого загрузочного лотка двухступенчатым с приданием его второй ступени стреловидной конфигурации с вогнуто-параболической формой нижней кромки для подачи повышенного количества шихты к бортам паллеты гарантирует повышение газодинамического сопротивления прибортового слоя шихты, что способствует выравниванию скорости спекания по ширине агломашины.

6. Применения пятисекционной гладилки с автономными утяжеленными секциями, в конструкции которой предусмотрены элементы, позволяющие регулировать уплотняющее воздействие на зоны слоя, расположенные у бортов паллеты, обеспечивает рациональное увеличение объемной плотности верхних горизонтов слоя шихты на 150-170 кг/м<sup>3</sup>, благодаря чему сокращается удельный расхода тепла на зажигание топлива шихты, снижается неравномерность спекания по ширине агломашины, повышается прочность агломерата.

Использование загрузочного комплекса шихты и совершенствование на его основе технологии загрузки высокоофлюсованной шихты на агломашину позволяет повысить среднюю высоту слоя на 50 мм, снизить содержание мелочи классов 0-5 мм в агломерате на 1-2 % (абс.), уменьшить расход твердого топлива (коксика) на процесс спекания на 3-5 кг/т агломерата, сократить выбросы в атмосферу вредных веществ, возможно повышение производительности агломашины на 7-10 %.

*Соответствует оригиналу  
Учёный секретарь  
диссертационного совета*



*А.В. Яковченко*



Снижение себестоимости агломерата ( $\Delta C_{agl}$ ) за счёт монтажа на каждую агломашину загрузочного комплекса и совершенствования технологии загрузки шихты на паллеты рассчитывали по формуле:

$$\Delta C_{agl} = C \cdot \frac{\Delta K}{1000},$$

где  $C$  – цена 1 т твердого топлива (коксика) на момент проведения исследований (2019 г.),  $C = 2838$  руб.;

$\Delta K$  – сокращение расхода коксика после внедрения рекомендаций,  
 $\Delta K = 4$  кг/т агломерата.

Таким образом, снижение себестоимости агломерата составит:

$$\Delta C_{agl} = 2838 \cdot \frac{4}{1000} = 11,35 \text{ руб./т агломерата.}$$

Ожидаемый годовой экономический эффект определен по формуле:

$$\Delta z = \Delta C_{agl} \cdot Pr$$

где  $Pr$  – годовая производительность агломерационного цеха, т/год.

С учетом того, что годовое производство агломерата на ЕМЗ составляет в среднем 1,0 млн. т в год, экономический эффект составит:

$$\Delta z = 11,35 \cdot 1\,000\,000 = 11\,350\,000 \text{ руб./год} = 11,35 \text{ млн.руб./год}$$

Доля Я.Ю. Асламовой составляет 5 %, то есть 567,5 тыс. руб.

Данный расчет не является основанием для финансовых выплат и предоставлен в диссертационный совет.

Начальник агломерационного цеха



Н.Н. Коробкин

Профессор кафедры экономики  
предприятия и инноватики  
ГОУВПО «ДОННТУ»,  
канд. эконом. наук, доц.



Т.А. Степанова

*Соответствует оригиналу  
Учёный секретарь  
диссертационного совета*

*Д.О. 019.03*



*— А.В. Яковченко*



Соответствует оригиналу  
Уданный секретарь  
диссертационного совета



— Д.В. Яковченко

**ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА  
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
"ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"**

283001, г. Донецк, ул. Артема, 58 тел.: (062) 337-17-33, 335-75-62, факс: (062) 304-12-78  
эл. почта: donntu.info@mail.ru

16.09.20 № 30-12/139

На № \_\_\_\_\_

Диссертационный совет Д 01.019.03 при  
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**СПРАВКА**

о внедрении результатов исследований диссертационной работы **Асламовой Яны Юрьевны «Обоснование параметров слоя высокоофлюсованной шихты и технологии его формирования на агломерационной машине»**, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.02 – **Металлургия черных, цветных и редких металлов (технические науки)** в научно-исследовательские работы кафедры «Руднотермические процессы и малоотходные технологии» ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

При выполнении научно-исследовательских работ:

«Разработка теоретических основ и управление технологией доменной плавки, обеспечивающей выход на качественно новый уровень технико-экономических показателей (расход кокса 250-300 кг/т чугуна, КИПО 0,3-0,4), полную утилизацию металлургических отходов и экологическую безопасность», которая выполнялась с 01.01.2002 по 31.12.2004 г.;

«Разработка ресурсо- и энергосберегающей технологии доменной плавки с целью достижения в доменных цехах Донбасса современного технического уровня: расход кокса до 300 кг/т чугуна, производительность 2,5-3 т/(м<sup>3</sup>·сутки)», которая выполнялась с 01.01.2017 по 31.12.2019 г.;

«Разработка научно-практических рекомендаций по совершенствованию технологии и модернизации технологического оборудования подготовки агломерационной шихты к спеканию с целью повышения прочности и выхода годного агломерата, уменьшения удельного расхода твердого топлива, достижения социальных и эколого-экономических результатов в условиях Донецкой Народной Республики», которая выполняется с 01.01.2020 г.,

в которых **Асламова Яна Юрьевна** принимала участие в качестве исполнителя, и в настоящее время участвует в качестве ответственного исполнителя, использованы полученные в диссертационной работе научно-технические разработки и предложения по совершенствованию подготовки к спеканию и модернизации технологической операции загрузки высокоофлюсованных агломерационных шихт с повышенным содержанием железосодержащих отходов, позволяющие повысить прочность агломерата, снизить потребление твердого топлива на процесс спекания и повысить экологическую безопасность аглопроизводства.

Проректор по научной работе,  
д-р техн. наук, профессор

Заведующий кафедрой  
«Руднотермические процессы и  
малоотходные технологии», канд. техн. наук, доцент



С.В. Борщевский

В.В. Кочура



Соответствует оригиналу  
Удостоверен секретарь  
диссертационного совета

DOI. 019.03

А.В. Яковченко



**ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА  
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
"ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"**

283001, г. Донецк, ул. Артема, 58 тел.: (062) 337-17-33, 335-75-62, факс: (062) 304-12-78  
эл. почта: donntu.info@mail.ru

16.09.20 № 30-12/140

На № \_\_\_\_\_

Диссертационный совет Д 01.019.03 при  
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**СПРАВКА**

о внедрении результатов исследований диссертационной работы **Асламовой Яны Юрьевны «Обоснование параметров слоя высокоофлюсованной шихты и технологии его формирования на агломерационной машине»**, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.02 – **Металлургия черных, цветных и редких металлов (технические науки)** в учебный процесс кафедры «Руднотермические процессы и малоотходные технологии» ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Разработанные в диссертации **Асламовой Я.Ю.** «Обоснование параметров слоя высокоофлюсованной шихты и технологии его формирования на агломерационной машине», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.02 – **Металлургия черных, цветных и редких металлов (технические науки)**, способ выравнивания скорости спекания по ширине агломашины и увеличения объемной плотности верхних горизонтов слоя шихты, обоснование рациональных параметров слоя высокоофлюсованной шихты, формируемого на агломашине, установленные закономерности распределения гранулометрического состава шихты по ширине загрузочной воронки и агломашины используются в курсе «Технология подготовки железорудного сырья» при подготовке магистров по направлению подготовки 22.04.02 «Металлургия», магистерская программа «Металлургия чугуна».

Проректор по научно-педагогической работе  
д-р техн. наук, профессор



А.Б. Бирюков

Заведующий кафедрой  
«Руднотермические процессы и малоотходные технологии», канд. техн. наук, доцент

В.В. Кочура