

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 ВЫСОКОФЛЮСОВАННОЙ  
ШИХТЫ И ТЕХНОЛОГИИ ЕГО ФОРМИРОВАНИЯ НА  
АГЛОМЕРАЦИОННОЙ МАШИНЕ**

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

**Автореферат**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

**г. Донецк – 2020**

Работа выполнена в ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» Министерства образования и науки Донецкой Народной Республики, г. Донецк.

**Научный руководитель**      кандидат технических наук, старший научный сотрудник  
**МИЩЕНКО Иван Митрофанович**

**Официальные оппоненты:**

**Ведущая организация:**

Защита состоится «\_\_\_\_\_» 2020 года в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 01.019.03 при ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, I учебный корпус, 1.203.

Тел. факс: +38 (062) 304-30-55, E-mail: uchenovet@donntu.org.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке организации ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, II учебный корпус, интернет <http://donntu.org>.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» 2020 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 01.019.03

А.В. Яковченко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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 агломашины, при которой обеспечиваются рациональные параметры формируемого слоя, достигается улучшение основных показателей производства агломерата.

Основные параметры слоя шихты на агломашинах 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. Хлапонина 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 агломашины.
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 агломашины.

**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 агломашину 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 агломашины.** Показано, что в загрузочной воронке агломашины 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 агломашины за счёт выравнивания газодинамического сопротивления слоя шихты по его ширине.** Плавное увеличение высоты слоя от 350-380 мм в центральной зоне агломашины до 400-430 мм у её бортов обеспечивает формирование слоя с вогнуто-параболической 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 агломашины 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 агломашины отличается не более чем на 50°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 агломашины 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 агломашины. 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 аprobация результатов.** Достоверность и новизна научных и технических решений, обоснованность выводов и рекомендаций работы подтверждаются корректным использованием аprobированных 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: Перспективи розвитку очима молодих вчених» (г. Донецк, май 2010 г.); международной «Університетська 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.).

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первый раздел **«Современное состояние технологии загрузки шихты и производства высокофлюсованного агломерата»**.

Типовые комбинированные загрузочные устройства не в полной мере соответствуют требованиям, предъявляемым к процессу загрузки: сформированный на агломашине слой неравномерно спекается по ширине, из-за чего ухудшаются показатели прочности агломерата, снижается производительность агломашин.

Примеров успешного преодоления такой неравномерности, особенно применительно к условиям спекания высокофлюсовых шихт, в настоящее время не выявлено. На основе выполненного анализа литературных источников поставлены цели работы и сформулированы задачи исследований.

Второй раздел **«Методики выполнения лабораторных и промышленных исследований процессов загрузки и спекания высокофлюсированной аглошихты»**.

Аналитические и лабораторные исследования формирования слоя шихты на агломашине, анализ технологии спекания высокофлюсированной шихты проведены на кафедре РТПиМТ под руководством профессора И.М. Мищенко. Промышленные исследования процесса загрузки шихты выполнены в аглоцехе ЕМЗ.

Гранулометрический и химический составы материалов, показатели плотности шихты, прочности агломерата исследовали в соответствии с действующими стандартами (ГОСТ 25732-88, ГОСТ 32520-2013, ГОСТ 15137-77 и др.) и разработанными методиками.

Характер формирования слоя высокофлюсированной шихты в загрузочной воронке, газодинамические свойства слоя шихты изучали по общезвестным методикам.

Оценку параметров и показателей спекания высокофлюсированной шихты на агломашине проводили, используя методы математической статистики.

Газодинамическую работу агломашины оценивали с помощью инженерной модели ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники».

Третий раздел «Исследование процесса спекания высокоофлюсованной шихты в условиях аглоцеха Енакиевского металлургического завода».

Анализ условий и показателей работы аглоцеха ЕМЗ (четыре агломашины площадью спекания  $62,5 \text{ м}^2$  каждая) позволил выявить основные факторы, влияющие на прочность высокоосновного агломерата – это высота слоя шихты ( $H_{cl}$ ), мм; скорость спекания шихты ( $v_{спек}$ ), мм/мин; содержание отходов ( $R_{втор}$ ) и концентрата ( $R_{конц}$ ) в железорудной части шихты, %; доля в шихте топлива ( $R_{топл}$ ) и извести ( $R_{изв}$ ), %; основность шихты ( $B$ ), абс. ед.; содержание Fe ( $R_{Fe}$ ) и FeO ( $R_{FeO}$ ) в агломерате, %. Основные параметры и показатели работы аглоцеха в 2019 г. показаны в таблице 1.

Таблица 1. Показатели работы аглоцеха ЕМЗ в 2019 г.

Параметры и показатели	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
Удельная производительность, т/( $\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ )	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 шихты, 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
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	-	-	-	-
вторресурсы	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
Прочность агломерата по содержанию фракции 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

Для производства агломератов повышенной (1,3-1,9 абс. ед.) и высокой (1,9-5 абс. ед.) основности при нерегулярных поставках железорудного сырья применялись шихты с удельными расходами, кг/т агломерата: концентрат 199-558; аглоруда 0-505; железосодержащие отходы 187-725.

Показатели прочности агломерата по выходу фракции более 5 мм составляют 66,2-71,2%, по содержанию фракции менее 5 мм – 12,8-17,5%; в отдельные периоды этот показатель резко ухудшался до 20,4-21,8%. Достаточная прочность агломерата достигалась в условиях медленного просасывания воздуха через слой, когда скорость спекания составляла 8-13,8 мм/мин, в отдельные периоды снижаясь до 5 мм/мин, при разрежении в газовых коллекторах агломашин 3,3-5,7 кПа и удельной производительности 0,5-0,86 т/( $\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ ).

Дано научное обоснование реализованной на практике уникальной возможности получения достаточно прочных агломератов высокой основности (2-5 абр. ед.) при ультразвуковых скоростях спекания шихты 8-9 мм/мин. Это обусловлено тем, что при невысокой скорости фильтрации газов максимум температуры подогреваемой шихты гармонично сближается с зоной горения твёрдого топлива, что улучшает газодинамику процесса спекания; уровень достигаемых температур 1200-1230 °С в условиях медленного горения топлива достаточный для спекания высокоофлюсованной шихты; замедленное охлаждение расплава способствует более полной кристаллизации его фазовых составляющих, повышению прочности агломерата.

Влияние технологических условий на прочность агломерата по содержанию в нём фракции менее 5 мм ( $X_{0-5}$ , %) оценивали с помощью регрессионного анализа. Обработку данных производили по двум периодам, состоящим из 125 наблюдений каждый:

- 1) период 1 – содержание фракции менее 5 мм в агломерате 12,8-17,5%;
- 2) период 2 – содержание фракции менее 5 мм в агломерате 20,4-21,8%.

Графическая зависимость содержания фракции менее 5 мм в агломерате от вышеуказанных факторов представлена на рисунке 1. Заданная прочность агломерата по содержанию в нём фракции менее 5 мм на уровне 12,8-17,5% в течение периода 1 обеспечена, в основном, за счёт спекания шихты в высоком слое.

Для прогнозного расчёта содержания фракции менее 5 мм в агломерате были получены уравнения множественной регрессии для обоих периодов.

Для периода 1:

$$X_{0-5} = 27,2 - 0,02 \cdot H_{cl} + 0,3 \cdot v_{spk} + 0,09 \cdot R_{kon} + 0,09 \cdot R_{etop} - 0,33 \cdot R_{uzv} - 0,80 \cdot R_{mon} - 0,78 \cdot B - 0,20 \cdot R_{Fe} + 0,11 \cdot R_{FeO} \quad (1)$$

Для периода 2:

$$X_{0-5} = 19,65 - 0,04 \cdot H_{cl} - 0,09 \cdot v_{spk} - 0,02 \cdot R_{kon} - 0,04 \cdot R_{etop} + 0,07 \cdot R_{uzv} - 1,35 \cdot R_{mon} + 0,61 \cdot B + 0,34 \cdot R_{Fe} + 0,12 \cdot R_{FeO} \quad (2)$$

Коэффициент множественной корреляции для уравнения (1) составил 0,79, а для уравнения (2) – 0,52, что свидетельствует о достаточно высокой тесноте связи. Уравнение (1) соответствует высоте слоя 350 мм и более, а уравнение (2) – высоте слоя менее 350 мм.

**Четвёртый раздел «Исследование процесса формирования слоя высокоофлюсованной шихты на агломашине».**

В промышленных условиях исследовали распределение граностава шихт основностью 2,5 и 3,5 абр. ед. по ширине бесчелноковой загрузочной воронки и агломашины.

При соосной установке барабана-окомкователя и загрузочной воронки поверхность слоя шихты в вертикальном сечении имеет криволинейное очертание в виде выпуклой параболы (рисунок 2 а), что подтверждено на лабораторной модели загрузочной воронки (рисунок 2 б).

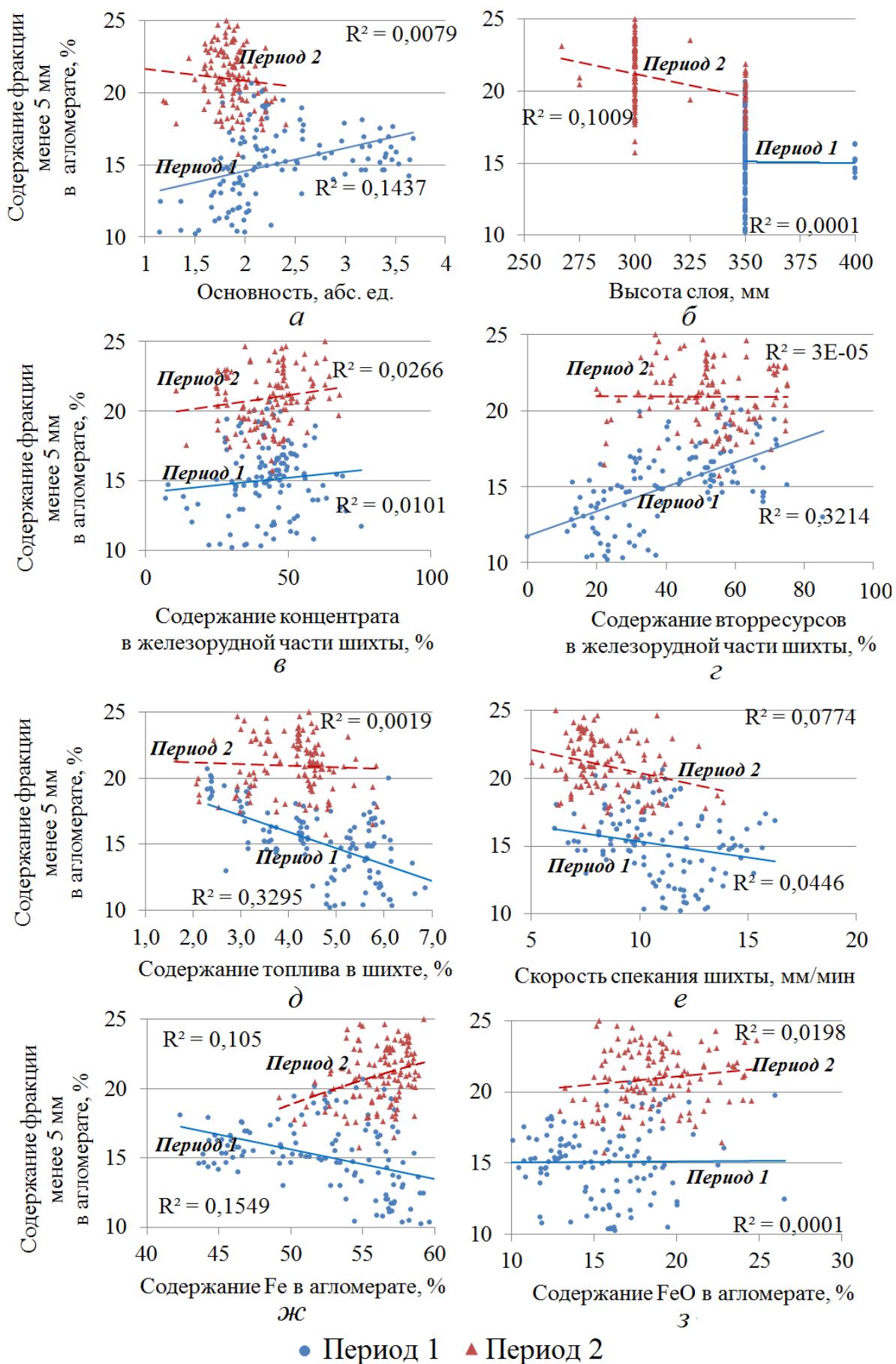


Рисунок 1. Влияние параметров процесса спекания на прочность высокоосновного агломерата

Профиль слоя может быть несимметричным относительно вертикальной оси загрузочной воронки. При несимметричном расположении конуса загрузки 4 (рисунок 2) в воронке 2 по более длинной его образующей *OA* сегрегируют большие массы крупной шихты, чем по более короткой образующей *OB*.

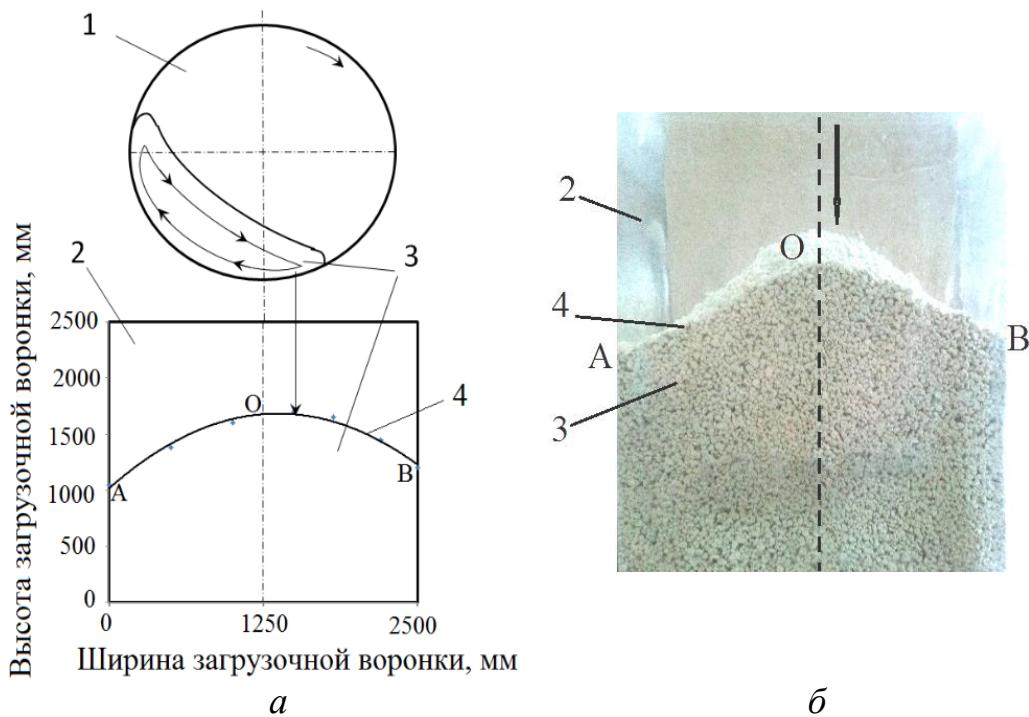


Рисунок 2. Профиль слоя шихты в бесчелноковой загрузочной воронке:  
*а* – графическая модель; *б* – физическая модель;  
1 – барабан-окомкователь; 2 – загрузочная воронка; 3 – шихта; 4 – конус загрузки

Рассев шихты, отобранный по ширине загрузочной воронки, показал, что содержание фракции более 5 мм у боковых стенок загрузочной воронки на 55-60% (отн.) выше, чем в её осевой части.

Зависимость расчётного изменения газодинамического сопротивления слоя шихты по ширине воронки представлена кривой, подобной выпуклой параболе (кривые рисунка 3 *в*). В центральной части загрузочной воронки формируется слой шихты повышенного газодинамического сопротивления, в пристеночных зонах – пониженного.

В результате исследований (рисунок 3 *а*, *б*, *в*) сделан вывод о том, что профиль поверхности шихты и соответствующая ему кривая газодинамического сопротивления слоя (рисунок 3 *в*) напоминает выпуклую параболу, растянутую по ширине агломашины.

Газодинамическое сопротивление периферийных слоев шихты на паллете, по лабораторным исследованиям, минимум на 12-15% ниже, чем осевого слоя. Насыпная плотность периферийных слоев на 5-6% ниже, чем в центре. Содержание углерода в шихте периферийных слоев на 0,2-0,35% (абс.) меньше, чем в шихте центральных слоев (рисунок 4). Таким образом, в слой периферийной зоны тепла вносится меньше. Эти факторы в совокупности с пристеночным эффектом ведут к тому, что процесс спекания шихты у бортов заканчивается быстрее, чем в центре.

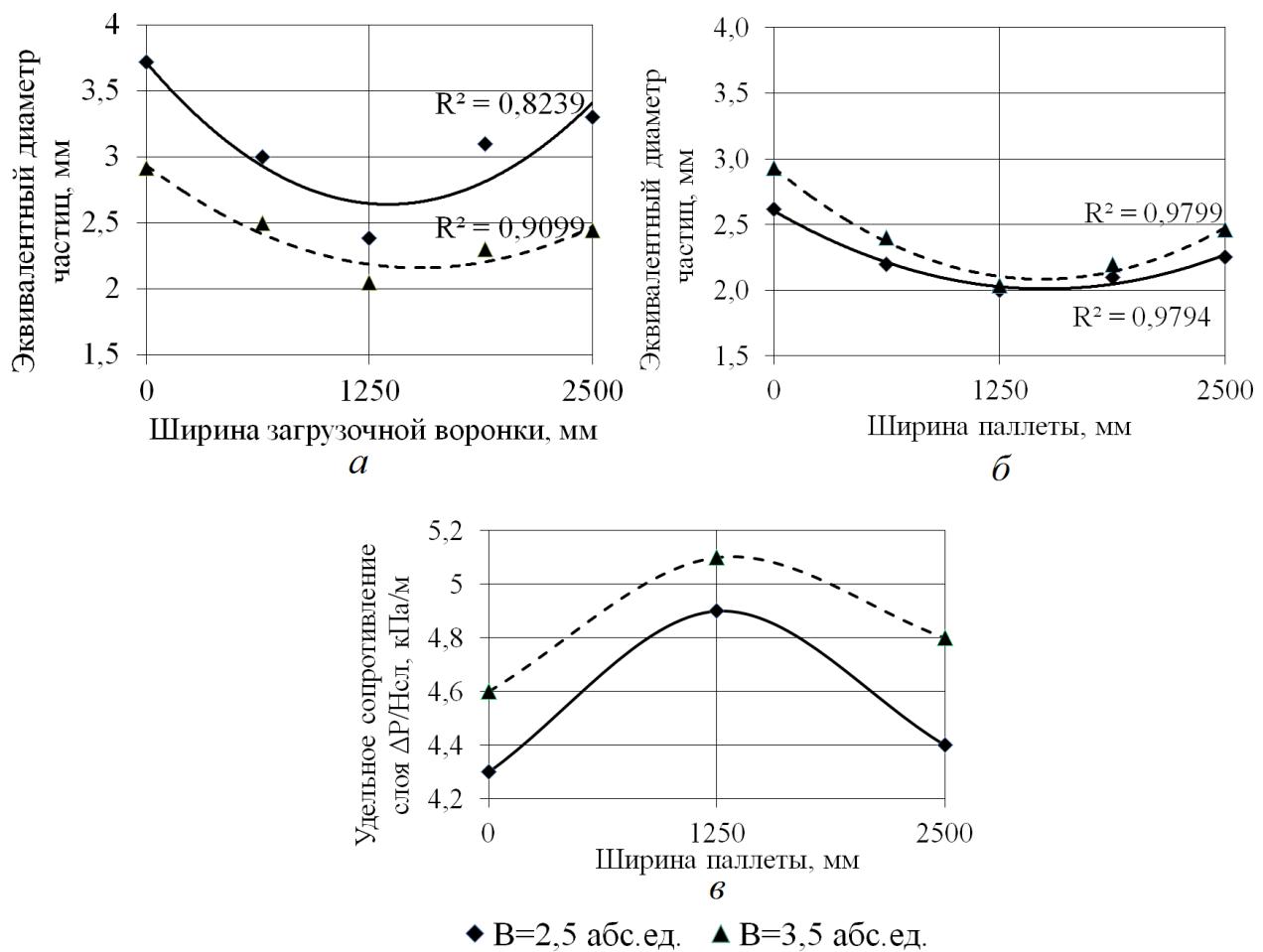


Рисунок 3. Исследование распределения гранулометрического состава и удельного газодинамического сопротивления слоя шихты:  
 а и б – распределение шихты по крупности по ширине загрузочной воронки и по ширине паллеты соответственно (промышленные данные);  
 в – изменение удельного газодинамического сопротивления слоя шихты по ширине агломашины (лабораторные исследования)

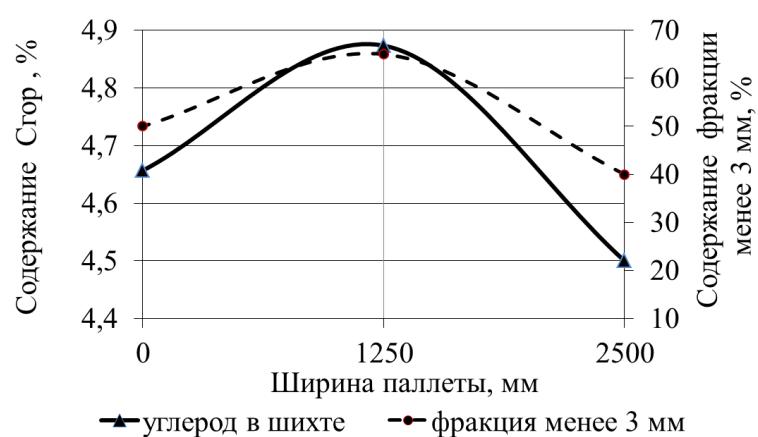


Рисунок 4. Распределение фракции менее 3 мм и горючего углерода в шихте по ширине агломашины

Экспериментально установлено, что структура слоя, образовавшегося в загрузочной воронке, синхронно передается на агломаину – соотношение классов круп-

ности по ширине слоя на агломашине качественно не меняется. Из рисунков 3 *а* и 3 *б* видно, что графики изменения эквивалентного диаметра частиц шихты основностью 2,5 и 3,5 абс. ед. по ширине загрузочной воронки и по ширине агломашины согласуются.

Для обеспечения рационального режима спекания и достижения заданных показателей по объёму производства и прочности агломерата слой высокооффлюсованной шихты на агломашине должен соответствовать следующим параметрам.

1. *Высота слоя шихты на агломашине не менее 350-380 мм.* Рациональным подходом к формированию профиля слоя шихты на агломашине, отличающимся научной новизной, является плавное увеличение высоты слоя на периферийных участках, представленных более крупной шихтой и меньшим содержанием в ней топлива вследствие неравномерного её 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 счёт уменьшения вредных прососов, увеличения общей скорости спекания и повышения выхода годного продукта из аглоспека.

2. *Рациональное и относительно стабильное во времени распределение гранулометрического состава шихты, твёрдого топлива и основности по высоте слоя.*

Рациональное распределение грансостава шихты состоит в том, что крупность частиц шихты должна линейно увеличиваться от верхнего горизонта слоя к нижнему (рисунок 5); для формирования слоя естественной постели толщиной 30-40 мм содержание фракции более 5-7 мм в шихте должно составлять 7-10%.

Рациональное распределение основности шихты и горючего углерода в составе шихты по высоте слоя должно быть близкое к линейному: вверху слоя – максимальные значения названных величин, внизу – минимальные (рисунок 6).

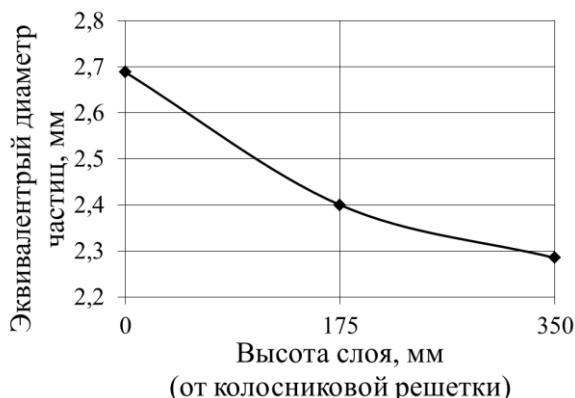


Рисунок 5. Распределение шихты по крупности по высоте слоя

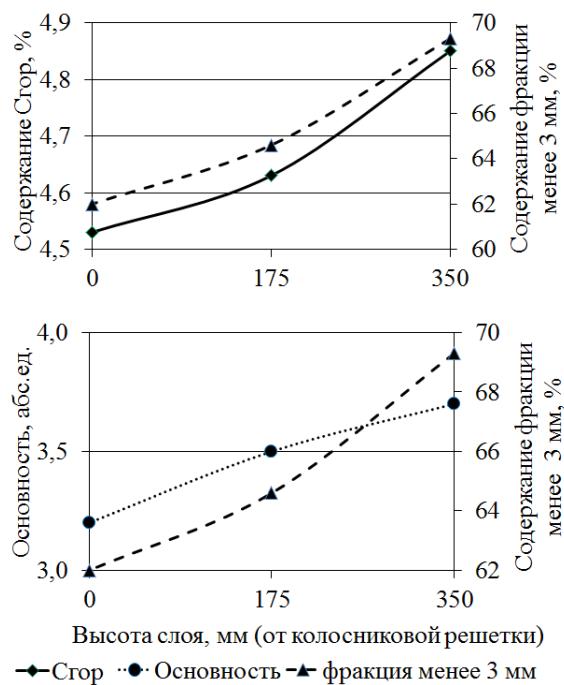


Рисунок 6. Изменение химического состава шихты основностью 3,5 абс. ед. по высоте слоя

При повышении основности шихты на 1,0-1,5 абс. ед. от 1,3-1,4 абс.ед. массовая доля частиц известняка увеличивается в 1,5-2,5 раза. Частицы известняка, соответствующие по крупности частицам топлива, обладают большей плотностью и массой и движутся по плоскости загрузочного лотка быстрее, поэтому сегрегируют, преимущественно, в средние горизонты слоя. В таких условиях степень сегрегации топлива в верхние горизонты слоя возрастает ориентированно на 0,2-0,3% (абс.).

3. *Насыпная плотность шихты в верхней части слоя, близкая по величине к плотности шихты средней части.* Насыпная плотность шихты по высоте и ширине слоя неравномерна (таблица 2). 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.

Таблица 2. Насыпная плотность шихты по высоте и ширине слоя

Место отбора проб	Правый борт			Центр			Левый борт			Среднее
	верх	центр	низ	верх	центр	низ	верх	центр	низ	
Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	1600	1750	1630	1700	1790	1690	1620	1780	1650	1690

Максимум выхода годного агломерата достигается при плотности шихты примерно 1800 кг/м<sup>3</sup>. В рассматриваемом случае рациональным является увеличение насыпной плотности верхних горизонтов слоя на 150-160 кг/м<sup>3</sup>.

Для обеспечения рациональных параметров слоя шихты на агломашине предлагается совершенствование загрузки шихты с целью регулирования скорости спекания по ширине слоя. Его суть состоит в следующем:

- уменьшение сегрегации шихты в бесчелноковой загрузочной воронке путём сглаживания поверхности слоя, образующегося в ней при ссыпании потока шихты из барабана-окомкователя, с помощью, например, распределителя шихты;
- формирование на агломашине 1 слоя шихты с вогнутопараболической формой поверхности 2 с высотой 4, увеличивающейся к бортам 3 (рисунок 7);
- уплотнение и заглаживание криволинейной поверхности слоя шихты, причём на шихту периферийных зон должно быть оказано большее уплотняющее воздействие, чем на шихту центральной зоны.

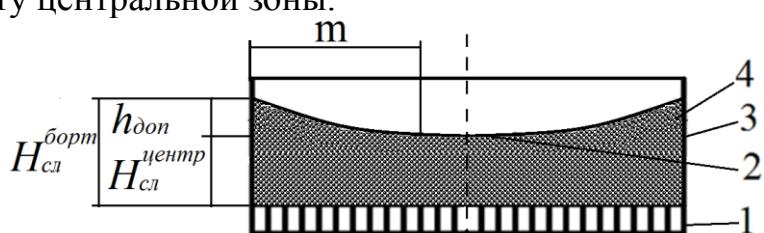


Рисунок 7. Рациональная форма слоя шихты на агломашине после ее загрузки:  
1 – паллета агломашины (вид спереди); 2 – поверхность слоя; 3 – борт паллеты;  
4 – прибортовая зона слоя

Определение высоты слоя  $H_{сл}^{борт}$  в прибортовой зоне 4 паллеты (рисунок 7) основано на необходимости обеспечения равенства коэффициента сопротивления

слоя, скорости фильтрации воздуха, а, следовательно, и скорости спекания по ширине агломашины. Исходя из этого получено уравнение для определения рациональной высоты слоя на прибортowych участках:

$$H_{\text{сл}}^{\text{борт}} = \left( \frac{\rho_{\text{центр}}}{\rho_{\text{борт}}} \right)^{0,73} \cdot \left( \frac{d_{\text{экв}}^{\text{борт}}}{d_{\text{экв}}^{\text{центр}}} \right)^{0,27} \cdot H_{\text{сл}}^{\text{центр}} \quad (3)$$

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

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

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

Расчётный анализ по уравнению (3) показывает, что для рассматриваемых условий загрузки шихты основностью 3,5 абс. ед. при высоте слоя в центральной зоне  $H_{сл}^{центр}=350-380$  мм высота слоя у борта должна быть больше на  $h_{don}=50-70$  мм в зависимости от качества подготовки шихты и составлять  $H_{сл}^{борт}=400-430$  мм.

## Пятый раздел «Совершенствование технологии загрузки шихты на агломашину».

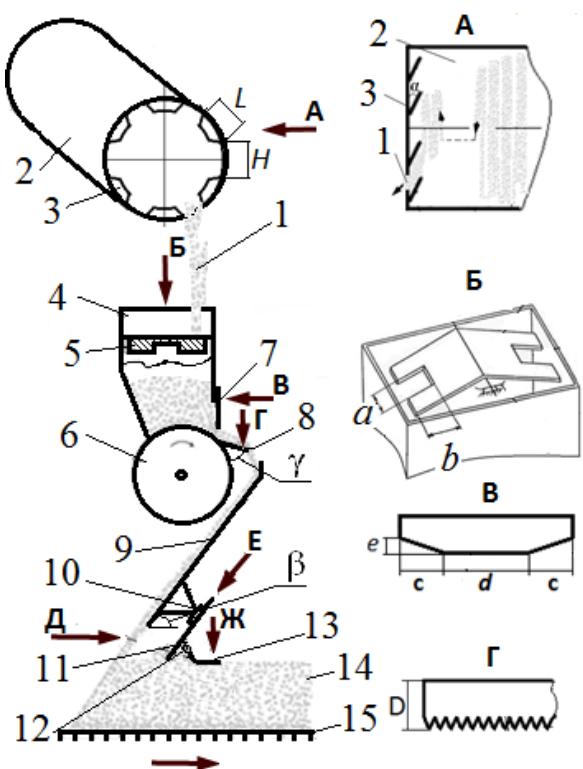


Рисунок 8. Принципиальная схема загрузочного комплекса шахты на паллеты агломерационной машины

Для формирования на агломашине слоя высокоофлюсованной шихты с рациональными параметрами предложена конструкция загрузочного комплекса (рисунок 8). Фрагменты, детализирующие виды по стрелкам  $D$ ,  $E$ ,  $Ж$ , показаны на рисунках 9 и 10.

Загрузочный комплекс работает следующим образом.

Направляющие сегменты 3, закрепленные на разгрузочном торце барабана-окомкователя 2, и распределитель шихты 5, установленный в загрузочной воронке 4, способствуют тому, что в загрузочной воронке поток шихты 1 при ссыпании с барабана-окомкователя формирует засыпь со сглаженной поверхностью. Исследования на физической модели профиля слоя шихты в загрузочной воронке при монтаже качающегося распределителя шихты показали, что образовался слой с волнообразной поверхностью с двумя слабо выраженным

пиками. Крупные частицы шихты сегрегируют не только к стенкам загрузочной воронки, но и в её центральную часть.

Выдача шихты из загрузочной воронки осуществляется барабанным питателем 6. Толщина слоя шихты регулируется шиберной заслонкой 7, установленной на разгрузочной щели воронки 4. Наличие в шиберной заслонке угловых срезов (вид по В) обеспечивает выдачу с пристеночных участков загрузочной воронки добавочного количества шихты, направляемого на увеличение высоты слоя в прибортовой зоне паллет. Непрерывность потока шихты обеспечивается зубчатым стабилизатором 8 (вид по Г).

Первая ступень 9 загрузочного лотка выполнена в виде наклонного отражательного листа с поверхностью, покрытой гидрофобным абразивостойким материалом. Она приподнята над слоем шихты, угол её наклона  $\beta$  составляет  $54-65^0$ , что создает условия для сегрегации частиц шихты.

Вторая ступень 11 (рисунок 8) состоит из двух металлических пластин 1 (рисунок 9), состыкованных под углом  $140-150^0$ . Её нижняя кромка 2 имеет конфигурацию вогнутой параболы за счёт концевых регуляторов 3. Благодаря второй ступени высота слоя в периферийной зоне паллет увеличивается на 50-70 мм и приобретает рациональную форму, показанную на рисунке 7.

Далее по ходу движения паллеты 15 (рисунок 8) слой шихты 14 поступает под секционную гладилку 13 (вид по Ж приведен на рисунке 10). Под ней сформированная поверхность слоя шихты заглаживается и уплотняется.

Предложены конструкции трёх- и пятисекционной гладилок с автономными утяжеленными секциями (рисунок 10). Секции гладилки крепятся к штанге 1 с помощью цепных тяг 2. Рациональный вес утяжеленных периферийных 3 и облегченных центральных 4 секций подбирается в условиях аглоцеха путём селекции нагрузки, оказываемой секциями на слой шихты.

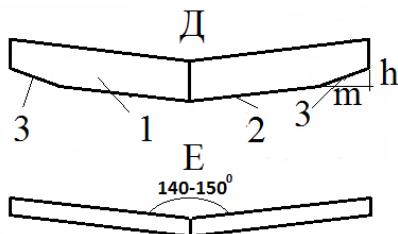


Рисунок 9. Вторая стреловидная ступень загрузочного лотка

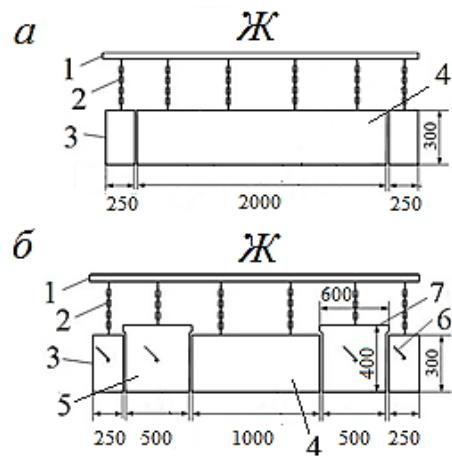


Рисунок 10. Схема гладилок поверхности слоя аглошахты:  
а – трехсекционной, б – пятисекционной

В пятисекционной конструкции предусмотрено постепенное увеличение уплотняющего воздействия на слой шихты и дополнительное сглаживание поверхности за счёт элементов 5, 6 и 7 (рисунок 9 б).

Трёхсекционная гладилка, конструкция которой аналогична приведенной на рисунке 10 *а*, прошла годовое промышленное испытание на трёх агломашинах ЕМЗ. По прямолинейной форме свечения излома спека (рисунок 11 *б*) 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 11 *а*.

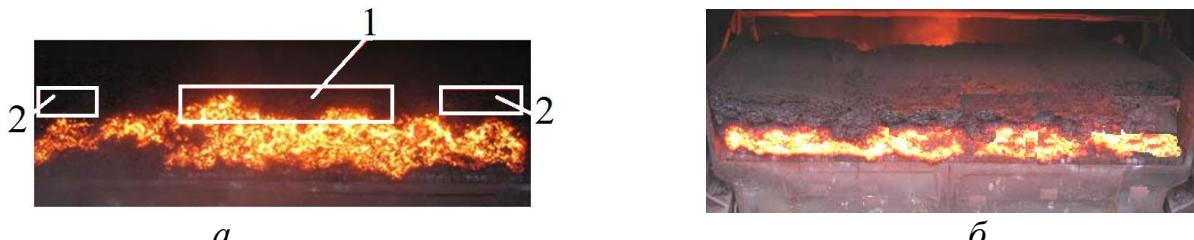


Рисунок 11. Фотография излома спека в хвостовой части агломашины до (*а*) и после (*б*) обработки поверхности слоя секционной гладилкой:

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

Аналитически определено, что 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%.

Совершенствование операции загрузки шихты за счёт оснащения агломашин загрузочным комплексом оказывает положительное влияние на их газодинамическую работу. Выравнивается скорость спекания шихты по ширине агломашины – разница скорости фильтрации газа по ширине слоя не превышает 0,05-0,07 м/с; температура отходящих газов в конце зоны спекания по ширине агломашины отличается не более чем на 50<sup>0</sup>С.

Внедрение загрузочного комплекса шихты обеспечивает защиту колосников и подколосниковых балок паллет в прибортовых зонах от преждевременного термоабразивного износа за счёт выравнивания скорости спекания шихты и уменьшения времени их пребывания при высоких температурах, уменьшения перепада температур по ширине подколосниковых балок, что исключает их тепловую деформацию.

Практические рекомендации по проектированию и совершенствованию загрузочного комплекса и технологии загрузки шихты на агломашины разработаны для аглоцеха ЕМЗ. Оснащение агломашин загрузочным комплексом предлагаемой конструкции позволит увеличить среднюю высоту спекаемого слоя на 30-50 мм, снизить содержание фракции менее 5 мм в агломерате на 1-2 % (абс.), уменьшить расход твёрдого топлива на процесс спекания на 3-5 кг/т агломерата, возможно повышение производительности агломашин на 7-10 %.

Ожидаемый экономический эффект по агломерационному производству от оснащения агломашин ЕМЗ загрузочным комплексом шихты составляет 11,35 млн. руб./год, долевое участие соискателя – 5% или 567,5 тыс. руб.

Прогнозируемое повышение экологической безопасности аглоцеха ЕМЗ обеспечивается технологическими мерами, направленными на сокращение потребления коксика на 10-15%, снижение выбросов в атмосферу на 12-15%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена **актуальная для развития чёрной металлургии ДНР научно-техническая задача** обоснования параметров слоя высокооффлюсованной 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 высокооффлюсованной 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 горизонту 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 углерода 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 кг/м<sup>3</sup> 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 кг/м<sup>3</sup>. 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 высокоофлюсированной 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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Научные работы, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях*

1. 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. (Обобщен мировой опыт модернизации аглопроизводства)
2. 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. (*Проанализирован технический уровень аглопроизводства предприятий Украины и Донбасса*)

3. 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** // Чёрная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2018. – №1. – С.37-48. (*Выполнена оценка выбросов вредных веществ в атмосферу в зависимости от основности агломерата и расхода топлива на процесс спекания*)

4. 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** // Чёрная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2018. – № 2. – С. 17-31. (*Выполнена оценка влияния повышенного расхода вторичных ресурсов в аглошихту на качество высокоосновного агломерата*)

5. 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** // Чёрная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2018. – № 3. – С. 24-36. (*Выполнена оценка влияния совершенствования загрузки шихты на экологическую нагрузку в зоне расположения аглофабрик*)

6. Опыт производства высокоофлюсованного агломерата на агломерационной фабрике Енакиевского металлургического завода / И.М. Мищенко, **Я.Ю. Асламова**, А.М. Кузнецов [и др.] // Чёрная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2018. – №12. – С. 33-45. (*Сформулированы рекомендации по совершенствованию технологии загрузки шихты на агломашину*)

7. Обоснование рациональных параметров слоя высокоофлюсованной шихты, формируемого на паллетах агломерационной машины / И.М. Мищенко, **Я.Ю. Асламова**, А.В. Кузин [и др.] // Вестник ДонНТУ. – 2020. – № 1 – С. 35-44. (*Предложены и обоснованы рациональные параметры слоя высокоофлюсованной шихты на агломашине*)

8. Технология производства высокоосновного агломерата в агломерационном цехе Енакиевского металлургического завода и возможные способы её совершенствования / И.М. Мищенко, **Я.Ю. Асламова**, Н.С. Хлапонин [и др.] // Чёрная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2020. – № 8. – С.790-802. (*Предложен способ регулирования скорости спекания по ширине агломашины; оценено влияние различных факторов на прочность агломерата*)

### ***Научные работы в материалах конференций***

9. 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 чёрной металлургии – 2019: Материалы IV Между-

нар. науч. конф. (Череповец, 18-20 сентября 2019 г.). – Череповец: ЧГУ, 2019. – С. 152-157. (*Предложены рекомендации по совершенствованию загрузки высокоосновной шихты*)

10. Колесник, И.А. Проблемы ресурсосбережения в аглококсодоменном производстве и пути их решения / И.А. Колесник, В.В. Кочура, Я.Ю. Асламова // Комплексное использование природных ресурсов: Сб. научн. тр. VIII Республикаской конференции (г. Донецк, 8 декабря 2016 г.) – Донецк: ДОННТУ, 2016. – С. 34-37. (*Обобщены данные о влиянии совершенствования аглопроизводства на повышение эффективности использования сырьевых ресурсов чёрной металлургии*)