

УДК 669.162

**И.М. Мищенко /к.т.н./, Я.Ю. Асламова, А.В. Кузин /к.т.н./**  
 ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

**Н.Н. Коробкин, А.В. Полохин**

Филиал №2 «Енакиевский металлургический завод» ЗАО «Внешторгсервис» (Енакиево)

## **ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СЛОЯ ВЫСОКООФЛЮСОВАННОЙ ШИХТЫ, ФОРМИРУЕМОГО НА ПАЛЛЕТАХ АГЛОМЕРАЦИОННОЙ МАШИНЫ**

*Определены и обоснованы параметры слоя высокоофлюсованной шихты, загружаемой на паллеты агломерационной машины. Показано, что их соблюдение позволяет обеспечить рациональные газодинамические и температурно-тепловые режимы спекания и достижение заданных показателей по объему производства и качеству агломерата.*

***Ключевые слова:** агломерат, высокоофлюсованная шихта, высота слоя, гранулометрический состав, топливо, объемная плотность.*

### **Постановка проблемы**

Производство агломератов повышенной (1,3...1,9 абс. ед.) и высокой (более 1,9 абс. ед.) основности целесообразно для использования их в доменной плавке с целью офлюсования малоофлюсованных окатышей, доля которых в железорудной части доменной шихты отечественных предприятий составляет от 40...60 до 80...100 %. Подтверждены экономические и экологические преимущества такой технологии [1,2].

Повысить показатели качества высокоофлюсованного агломерата и производительность агломерационных машин возможно за счет совершенствования технологии подготовки и спекания шихты. Важнейшей заключительной стадией подготовки аглошихты, во многом определяющей эффективное спекание, является ее загрузка на паллеты агломашин. Для разработки рекомендаций по модернизации технологии загрузки необходимо определить и обосновать рациональные параметры слоя аглошихты, формируемого на паллетах.

Рациональные параметры слоя высокоофлюсованной шихты – это такие его свойства, благодаря которым достигается селективное (повышенное) содержание частиц топлива и извести в его верхних горизонтах, равное газодинамическое сопротивление по ширине агломашин, и теплотехнические характеристики, способствующие компенсации дефицита тепла в верхней части слоя и минимизации избытка тепла в нижней, где проявляет себя регенерация тепла из верхних в нижние горизонты спекаемого слоя.

### **Анализ последних исследований и публикаций**

Масштабная экономическая и социально-

экологическая суть производства высокоосновного агломерата проявляется в снижении себестоимости чугуна за счет сокращения расхода кокса и в существенном улучшении экологической обстановки в районах расположения аглофабрик, доменных цехов и коксохимических заводов. Также развитие технологии производства высокоосновного агломерата мотивировано возможным улучшением его металлургических свойств и уменьшением выбросов преимущественно сернистых веществ в атмосферу [1,3...5].

В отдельных работах [1,4] обобщены опытные данные о технологии производства агломератов повышенной и высокой основности. Сформулированные рекомендации 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), однородности химического и гранулометрического составов агломерационной шихты.

Специфика производства высокоосновного агломерата состоит в нижеследующем.

Известны случаи [3], когда при спекании высокоосновной шихты образующийся расплав высокой текучести способен проникать из самого нижнего элементарного слоя горения топлива, в котором происходят процессы плавления шихты, в щели колосниковой решетки, закрывая их монолитной, заплывающей массой, резко ухудшающей газодинамику процесса спекания. Очистка колосниковой решетки агломашин от налипания агломерационного расплава является трудоемкой операцией.

Устранить такое вредное явление возможно при обязательном наличии в загружаемой на аг-

ломшины шихте достаточного количества (40...50 %) крупных фракций 6...10 мм аглоруды, возврата, других материалов, способных образовать сплошной слой естественной постели, разумеется, при обеспечении оптимальных условий сегрегации этих крупных фракций шихты в нижние горизонты слоя [6,7].

При производстве офлюсованных агломератов в структуре спеков возможно образование при температурах выше 1420 °С такой проблемной фазы, как высокотемпературная β-модификация двухкальциевого силиката 2CaO·SiO<sub>2</sub> (β-C2S), обладающей при охлаждении спека ниже 675 °С полиморфизмом, то есть способностью перестройки кристаллической решетки и перехода в иную γ-модификацию при увеличении объема этой фазы на 10 % [3,8...12].

Вероятность появления проблемной β-модификации обусловлена достижением максимальных температур в зоне плавления шихты, превышающих 1400 °С. При плавлении высокоосновной шихты в условиях умеренных температур 1220...1250 °С такая вероятность мала. При основности шихты 1,2...1,4 абс. ед. температура плавления достигает 1350...1380 °С и, следовательно, вероятность появления β-C2S и его силикатного распада существенно выше.

Использование в шихте тонких железорудных концентратов и труднокомкуемых отходов не является большим препятствием для производства высокоосновного агломерата удовлетворительного качества. Так, в агломерационном цехе Енакиевского металлургического завода (ЕМЗ) увеличение основности агломерата от 1,46 до 2,28 абс. ед. в нестабильных условиях работы сопровождалось снижением барабанной прочности от 66,1 до 63,5 % при практически неизменном содержании в агломерате фракции 0...5 мм – 16,46 и 16,73 % [13,14]. В ходе проведенных ранее опытно-промышленных исследований в условиях этого предприятия [4] было установлено, что при спекании шихт основностью 1,23...2,38 абс.ед., содержащих около 70 % богатого железорудного концентрата, увеличение расхода топлива на процесс не требуется – его содержание в шихте, по углероду горючему, остается в пределах 4,05...4,45 %.

Известно, что скорость спекания шихты, расположенной в прибортовой зоне паллеты, выше, чем в центральной части [15,16]. По этой причине снижается производительность агломашин на 8...10 %, ускоряется износ периферийных частей подколосниковых балок паллет. Для высокоофлюсованных шихт проблема усугубляется повышенной по сравнению с обычными шихтами газопроницаемостью.

В результате проведенного аналитического обзора литературных источников не выявлены специфические требования к загрузке высокоофлюсованных шихт, что объясняется недостатком информации об аналитических, лабораторных и промышленных исследованиях освоения технологии их спекания. Ввиду современных тенденций по переходу к производству агломератов высокой основности необходимо исследовать технологию формирования слоя шихты на агломашинах и аргументировать его рациональные параметры.

### Цель (задачи) исследования

Целью работы является обоснование параметров слоя высокоофлюсованной шихты на паллетах агломерационных машин с учетом специфики процессов ее подготовки и спекания.

### Основной материал исследования

Выбор параметров слоя высокоосновной шихты позволяет обеспечить оптимальные газодинамические и температурно-тепловые режимы ее спекания, достижение заданных показателей по объему производства и качеству агломерата. Чаще в отечественной практике эти показатели касаются прочности и гранулометрического состава агломерата.

Обоснование для условий конкретного производства параметров слоя дает возможность разработать меры по повышению эффективности управления процессом спекания высокоофлюсованной шихты. На основе исследований, выполненных в агломерационном цехе ЕМЗ, нами сформулированы рациональные параметры слоя, формируемого на паллетах. Такими параметрами являются:

- высота слоя высокоофлюсованной шихты на паллетах на уровне не менее 300...350 мм;
- идентичные гранулометрический, химический составы и газодинамические свойства слоя шихты по ширине агломерационной машины;
- рациональное распределение гранулометрического состава шихты и твердого топлива по высоте слоя;
- стабилизация объемной плотности шихты по высоте и ширине слоя.

Ниже приведено последовательное обоснование указанных параметров.

*Высота формируемого на паллетах агломашин слоя шихты*

Высота слоя шихты на паллетах является главным параметром, поскольку при ее увеличении кардинально улучшаются температурно-тепловые условия спекания шихты и формирования аглоспека повышенной прочности.

Увеличенная высота слоя при спекании шихты обеспечивает следующие преимущества. Возрастает доля участия в процессах горения топлива и плавления шихты регенерированного (возвращаемого всасываемым воздухом) тепла горячего охлаждающегося аглоспека, повышаются температуры и продолжительность пребывания расплава при благоприятных условиях кристаллизации основных минералов аглоспека. Значительно снижается потребность в теплоте от сжигания углерода топлива. Доля тепла регенерации в зональных тепловых балансах нагрева шихты нижних, преобладающих по толщине высокого слоя, элементарных слоев может достигать 65,5...71,2 % [17].

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. Как видно по кривым рис. 1 [1], теоретическая разница по содержанию углерода топлива в шихте верхних и нижних элементарных слоев может достигать 4...5 % (кривая 2). В промышленных условиях эта величина не превышает 1...1,5 %, потому что действующие загрузочные устройства при существующем гранулометрическом составе шихты не гарантируют высокую степень сегрегации частиц твердого топлива, сосредоточение их преимущественно в верхних горизонтах формируемого слоя. И все же для высокослойного спекания характерна большая экономия топлива, достигающая в среднем 4...5 % на каждые 50 мм увеличения высоты слоя. При этом повышение степени сегрегации шихты по углероду твердого топлива может давать дополнительную экономию топлива, по расчетам Ю.А. Фролова [16], от 2,2 до 6,2 % для слоев высотой, соответственно, 220 и 550 мм.

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 в 2017 году сооружена и запущена агломашина, на которой предусмотрено спекание шихты в слое 700 мм [1].

Высокослойное спекание шихты, как правило, сопровождается уменьшением расхода твер-

дого топлива, повышением прочности, улучшением гранулометрического состава агломерата, соответствующим значительным улучшением показателей доменного производства. Иногда возможно увеличение и производительности агломашин.

Отметим, что в производственных условиях решение вопроса об оптимальной высоте слоя шихты находится как компромисс между рациональной скоростью спекания (производительностью агломашин) и прочностью 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 годного агломерата, сокращения расхода твердого топлива на агломерацию, что особенно важно при спекании высокоофлюсованных шихт.

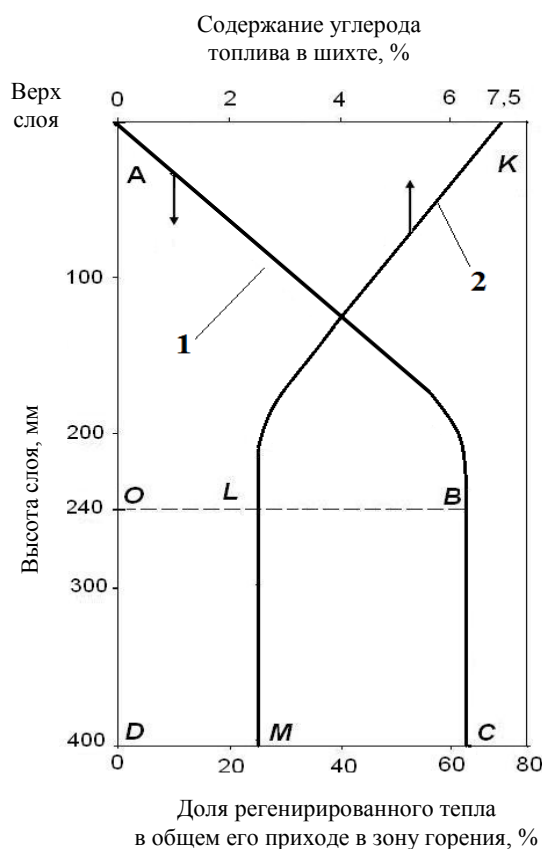


Рис. 1. Изменение доли регенерированного тепла в тепловом балансе зоны горения и содержание горючего углерода шихты по высоте слоев 240 и 400 мм: 1 – график, характеризующий приход регенерированного тепла по мере перемещения зоны горения топлива от верхних до нижних элементарных слоев; 2 – график оптимального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

Опыт производства в 2019 году в агломерационном цехе ЕМЗ агломерата основностью 1,8...5,0 абс.ед. является примером следования по пути неуклонного поддержания рациональной высоты спекаемого слоя даже в крайне сложных шихтовых и производственных условиях, когда утрачивались основные условия высокослойного спекания: достаточная газопроницаемость слоя шихты и обеспечение эксгаустерами необходимого разрежения под спекаемым слоем, при котором достигается минимально необходимая скорость фильтрации газов – скорость спекания шихты.

Параметры работы агломерационных машин ЕМЗ в 2019 году характеризуются низкой скоростью спекания, которая в среднем составляет 10 мм/мин, вследствие недостаточной газопроницаемости слоя шихты из смеси отходов и плохо комкующихся концентратов, а также малого разрежения в газовых коллекторах агломашин на уровне 4,5 кПа. При этом высота спекаемого слоя поддерживается на достаточном уровне, 300...350 мм, для достижения самого важного показателя – необходимой прочности агломерата. Поставленная цель реализуется вполне успешно: содержание класса 0...5 мм в агломерате составляет, в лучшие периоды 2019 года, от 12,8 до 17,5 %.

Таким образом, считаем обоснованным и целесообразным применение в дальнейшем технологического регламента спекания высокоофлюсованной шихты в повышенных слоях высотой 350...400 мм. Естественно, при выполнении системных мероприятий, касающихся повышения качества подготовки шихты и улучшения состояния газодинамических сетей агломашин.

*Идентичный гранулометрический, химический составы и газодинамические свойства слоя шихты по ширине агломерационной машины*

В обстоятельной монографии по исследованию теории и технологии агломерации [16] подчеркиваются требования по минимизации неоднородности гранулометрического состава шихты и концентрации топлива в объеме слоя, а также по равномерному распределению гранулометрического состава шихты по ширине слоя.

К сожалению, при существующих загрузочных устройствах и реальной крупности промышленных шихт указанные показатели по их распределению по ширине и по высоте формируемого слоя достигаются лишь частично.

В загрузочной воронке (промежуточном бункере) комбинированных загрузочных устройств агломашин узкий поток падающей из ба-

рабана-окомкователя окомкованной шихты преобразуется в широкий, соответствующий ширине агломашины, слой за счет «маятниковой» или «ленточной» укладки относительно тонких порций шихты. При загрузке загрузочной воронки простейшим способом (на конус) или при более совершенной загрузке воронки с помощью челнокового распределителя, не исключается сегрегация более крупной шихты на периферийные участки загружаемого в воронку слоя.

Новые исследования распределения гранулометрического состава шихты в загрузочной воронке агломашины №3 ЕМЗ показали, что по образующим конуса загрузки шихты из барабана-окомкователя в воронку (рис. 2) происходит сегрегация гранул, комков, укрупненных частиц шихты к ее боковым стенкам.

В итоге кривая распределения гранулометрического состава шихты по длине загрузочной воронки, соответствующей ширине агломашины, представляет собой кривую, напоминающую вогнутую параболу (рис. 3). Причем при несимметричном расположении конуса загрузки 4 в воронке 2 (рис. 2) по более длинной его образующей ОА сегрегируют большие массы крупной шихты, чем по более короткой образующей ОВ.

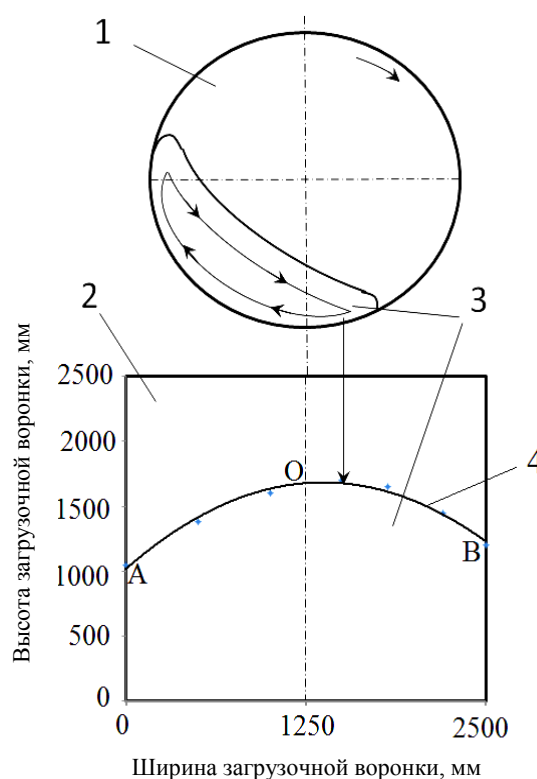


Рис. 2. Профиль слоя шихты в загрузочной воронке:

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

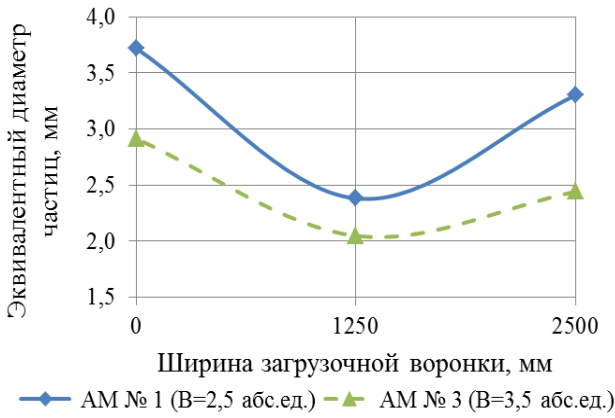


Рис. 3. Изменение гранулометрического состава шихт основностью 2,5 и 3,5 абс.ед. по ширине загрузочной воронки на агломашине № 1 и № 3 ЕМЗ

После синхронной, параллельными потоками, перегрузки шихты из загрузочной воронки на паллеты агломашины соотношение классов крупности по ширине слоя качественно не меня-

ется, что подтверждают проведенные исследования гранулометрического состава шихты по высоте и ширине слоя на паллете (рис. 4).

Из рис. 4 видно, что в прибортовых зонах паллет содержание в шихте фракции 0...3 мм различно и на 15...20 % ниже, чем в центральной зоне. С учетом того, что частицы топлива и известняка сосредоточены преимущественно в гранулах крупностью 0...3 мм, следствием выявленного распределения шихты по гранулометрическому составу является неоднородный по ширине агломашины химический состав шихты. По данным промышленных исследований (рис. 5), разница между содержанием углерода в шихте прибортовой и осевой зоны составляет 0,2...0,35 %. Следовательно, в периферийный слой шихты вносится тепла от горения топлива меньше, чем в слой осевой зоны.

В связи с выявленным распределением шихты по крупности по ширине паллеты интерес представляет изменение начальной газопроницаемости слоя по ширине агломашины.

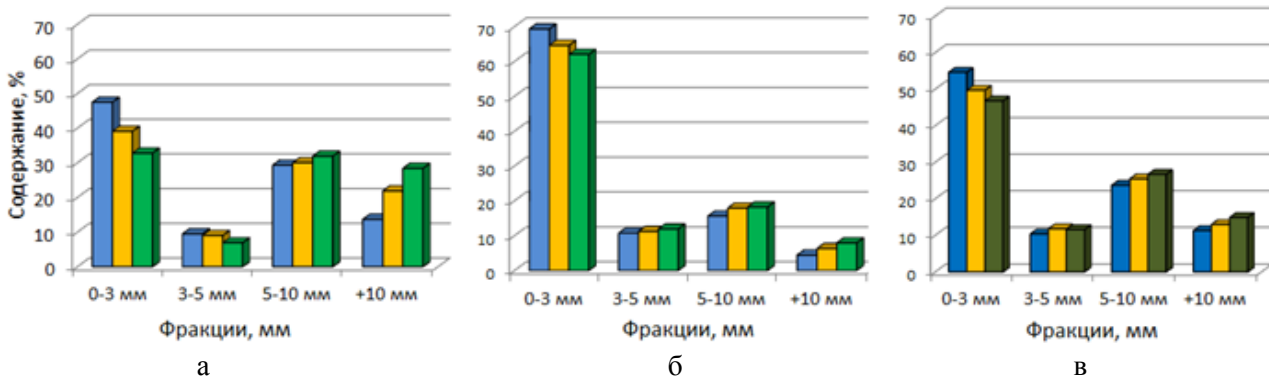


Рис. 4. Распределение шихты основностью 3,5 абс.ед. по крупности по ширине и высоте паллеты при высоте слоя 350 мм: а – левый борт; б – центр; в – правый борт; ■ верх слоя; ■ середина слоя; ■ низ слоя

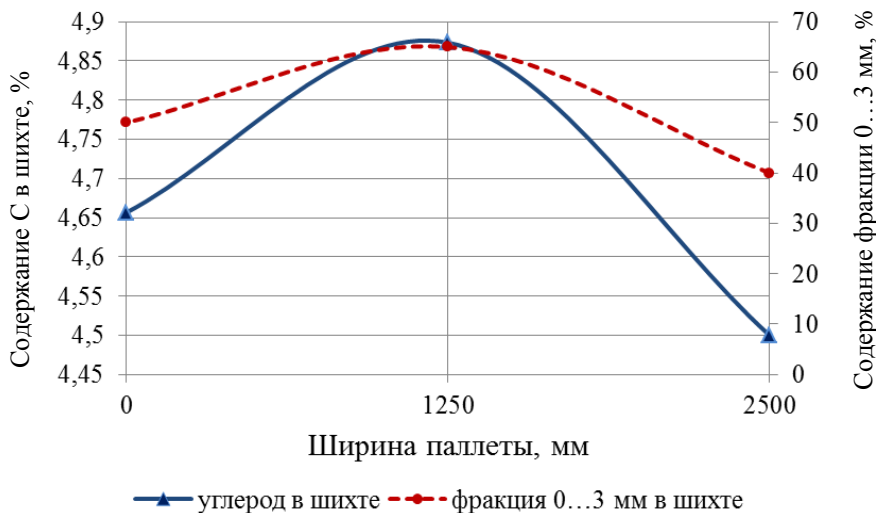


Рис. 5. Распределение фракции 0...3 мм и горючего углерода в шихте по ширине агломашины

В данном случае под начальной подразумевается газопроницаемость слоя, уложенного на агломашину, до начала процесса спекания. В качестве характеристики газопроницаемости может выступать величина удельного газодинамического сопротивления слоя, определяемая по формуле [16]:

$$C = \frac{\Delta P}{H_{сл}}$$

где  $C$  – удельное газодинамическое сопротивление слоя шихты, кПа/м;  $\Delta P$  – перепад давления газа в слое, кПа;  $H_{сл}$  – высота слоя, м.

Для оценки газопроницаемости слоя аглошихт различной основности проведены лабораторные исследования, по результатам которых получена зависимость перепада давления газа в слое шихты высотой 270 мм от гранулометрического состава по ширине паллеты. Полученная кривая, описывающая изменение удельного газодинамического сопротивления слоя по ширине агломашины с такой же, как в загрузочной воронке, гранулометрической характеристикой, представляет собой выпуклую кривую, похожую на параболу (рис. 6). Периферийные слои имеют явную повышенную газопроницаемость.

Измеренное в лабораторных условиях удельное газодинамическое сопротивление слоя осевой зоны на 10...12 % выше, чем слоев периферийной зоны. Этому способствует более крупная шихта периферийных слоев. На практике эта разница может составлять 25...50 % за счет действия пристеночного, прибортового эффекта.

По промышленным данным Ю.А. Фролова [18], шихта из тонкоизмельченного концентрата в слое 300 мм спекается в периферийных слоях

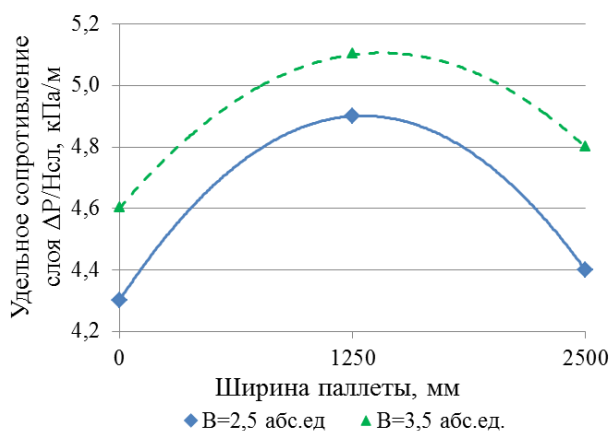


Рис. 6. Изменение удельного газодинамического сопротивления слоя шихты высотой 270 мм по ширине агломашины по лабораторным данным

шириной 250 мм от левого и правого бортов агломашины со скоростью, на 30 % превышающей скорость спекания шихты по оси агломашины. Только на расстоянии 500 мм от бортов скорость спекания практически не отличается от скорости спекания шихты по оси агломашины.

Образующиеся на периферии паллеты спеки шириной 250 мм обладают высокой газопроницаемостью и до завершения процесса спекания шихты по оси агломашины являются источниками больших вредных прососов атмосферного воздуха, вызывая потери производительности агломашин на 8...10 %.

Для периферийных участков аглоспека характерны повышенная пористость и низкая прочность. Подобные явления происходят, в том числе, и на агломашинах ЕМЗ.

Высоту слоя шихты на паллетах агломашин регулируют в зависимости от газодинамического сопротивления слоя и уровня разрежения в газовых коллекторах агломашин. Рациональным, с точки зрения авторов статьи, способом выравнивания газопроницаемости слоя по ширине паллеты является дополнительное увеличение высоты слоя на периферийных, прибортовых участках. В соответствии с данными исследований ситового состава и газодинамических свойств шихт различной крупности по ширине агломашины (рис. 6) предложено постепенное увеличение высоты слоя к бортам на 15...25 % от исходной высоты, начиная с точки значительного увеличения крупности шихты на кривой распределения гранулометрического состава по ширине паллеты, которая находится на расстоянии 500...700 мм от бортов паллеты (рис. 7).

*Рациональное распределение гранулометрического состава шихты и твердого топлива по высоте слоя*

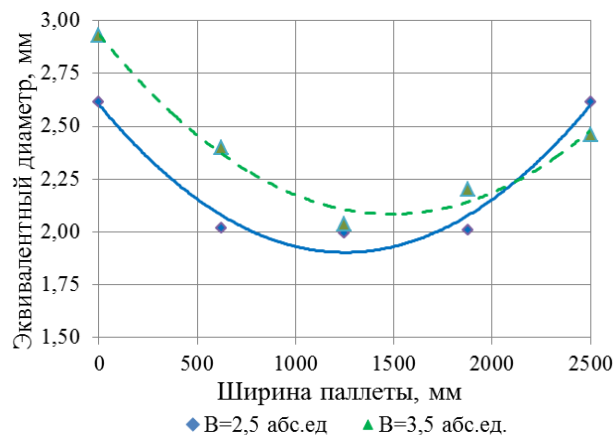


Рис. 7. Изменение показателя крупности высокоофлюсованной шихты по ширине паллеты



Одно из важнейших предназначений технологии загрузки шихты на паллеты агломашин – рациональное распределение гранулометрического состава и твердого топлива по высоте слоя. От этого параметра в значительной мере зависят прочность агломерата и производительность агломашин.

Управляет распределением шихты по высоте слоя процесс сегрегации, без которого невозможно проведение нормального спекания шихты.

Благодаря сегрегации содержание горючего углерода и оксида кальция, сосредоточенных в мелких фракциях шихты, в направлении поверхности слоя непрерывно повышается (рис. 8).

Рациональное распределение гранулометрического состава шихты по высоте слоя сопровождается снижением его газодинамического сопротивления, 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. ед., в сравнении с 6,5 % абс. ед. в верхнем слое (см. рис. 1).

В промышленных условиях наблюдается значительно меньшее отличие концентраций углерода твердого топлива и средней крупности шихты по высоте слоя. По горючему углероду шихты эта разница (верх и низ слоя) во многих случаях не превышает 0,9... 1,3 % абс. ед. [16].

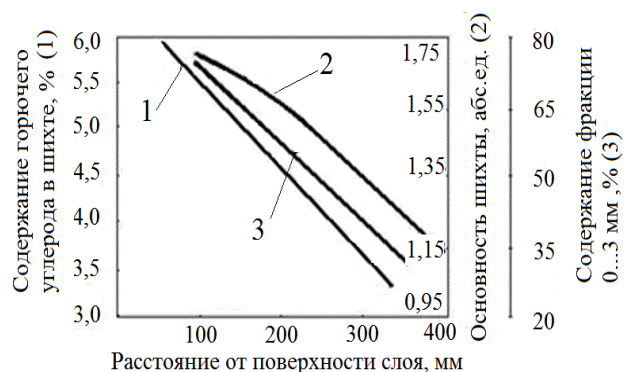


Рис. 8. Изменение крупности и химического состава шихты по высоте слоя [1]

Как было отмечено выше, в процессах подготовки и спекания высокоосновной шихты имеют место как минимум две негативные особенности, связанные с образованием большого количества жидкотекучего расплава, заплывающего щели колосниковой решетки, и возможностью возникновения в отдельных микрообъемах шихты  $\beta$ -C2S, склонного к силикатному распаду. По нашему мнению, чтобы устранить влияние этих факторов на качество агломерата, процесс спекания и рабочее состояние колосниковой решетки, требуется выполнение следующих условий:

– для образования в процессе сегрегации слоя естественной постели толщиной не менее 30...40 мм обязательно наличие в шихте, загружаемой на агломашину, не менее 10...15 % крупных фракций более 8 мм. Через такой сплошной слой невозможно проникновение высокоосновного расплава повышенной текучести в щели колосниковой решетки паллет агломашин и превращение их в неработоспособные. Нужное количество крупных фракций в шихте достигается выделением из агломерата достаточного количества крупного (до 10...14 мм) возврата и применением в рудной части шихты не менее 10...15 % аглоруды;

– для исключения образования в отдельных микрообъемах нижней части слоя проблемной высокотемпературной модификации  $\beta$ -C2S необходимо минимизировать наличие в твердом топливе крупных фракций, способных сегрегировать в нижние горизонты слоя и создавать там при горении локальные объемы проблемной фазы. То есть в случае производства высокоосновного агломерата технология измельчения твердого топлива должна гарантировать получение измельченного продукта крупностью 0...3 мм строго не менее 93...95 %.

*Формирование объемной плотности шихты в верхней части слоя, близкой по величине к плотности шихты средней части, выравнивание объемной плотности шихты по ширине паллеты*

Объемная плотность шихты в слое является важной физико-механической характеристикой, связывающей скорость спекания и прочность спека. В промышленных условиях объемную плотность обычно не регулируют, однако в случае формирования на паллетах слоя шихты с вогнутопараболической формой поверхности проблема повышения объемной плотности верхнего элементарного слоя заслуживает отдельного внимания. Кроме того, по данным опытно-промышленных исследований в условиях ЕМЗ, объемная плотность слоя шихты высотой 350 мм в приборной зоне ниже на 5...7 % объемной

плотности шихты осевой зоны. Следовательно, периферийные участки слоя имеют большую порозность и меньшее газодинамическое сопротивление, что является одной из причин повышенной скорости спекания шихты этой зоны.

Вогнутопараболическая форма поверхности слоя шихты 2 (рис. 9) с высотой 4, увеличивающейся к бортам 3, способствует решению задачи уравнивания скоростей спекания шихты в центре и на периферии паллеты 1. Криволинейную, на периферийных участках, поверхность слоя после формирования там дополнительных слоев, необходимо выравнять путем уплотнения и заглаживания поверхности секционной гладилкой особой конструкции с автономными утяжеленными боковыми секциями 3 с загнутой в виде лыжи передней кромкой (рис. 10). Утяжеленные 3 и облегченная 4 секции крепятся к штанге 1 подвижными цепными тягами 2.

После обработки секционной гладилкой поверхность слоя поступает под зажигательный горн плоской и уплотненной. В этом случае обеспечивается достаточная прочность аглоспека верхнего элементарного слоя [16]. При удельном давлении периферийных, самых тяжелых и узких, секций гладилки 3 (рис. 10), достигающем  $170...200 \text{ кг/м}^2$ , усадка слоя может составлять  $25...30 \text{ мм}$ , и объемная плотность шихты верхнего элементарного слоя толщиной  $30...40 \text{ мм}$  повышается ориентировочно на  $150...170 \text{ кг/м}^3$ , достигая рациональных значений плотности шихты средних слоев (для шихт из концентратов и отходов примерно  $1800...2000 \text{ кг/м}^3$ ), находящихся на глубине  $150...170 \text{ мм}$  от верха слоя. Давление, оказываемое центральной облегченной секцией 4 на осевую зону паллеты, ниже и составляет  $50...70 \text{ кг/м}^2$ . Повышение прочности верхней части спека ведет к увеличению выхода годного продукта из него, что компенсирует снижение скорости спекания уплотненного слоя и сохраняет производительность агломашин на прежнем уровне.

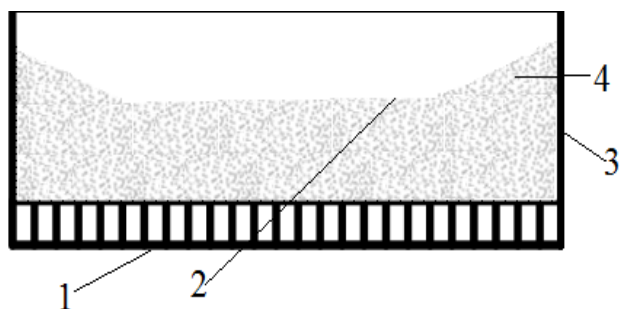


Рис. 9. Форма слоя шихты на паллете агломашин:  
1 – паллета; 2 – поверхность слоя шихты;  
3 – борт паллеты; 4 – периферийная увеличенная зона слоя аглошихты

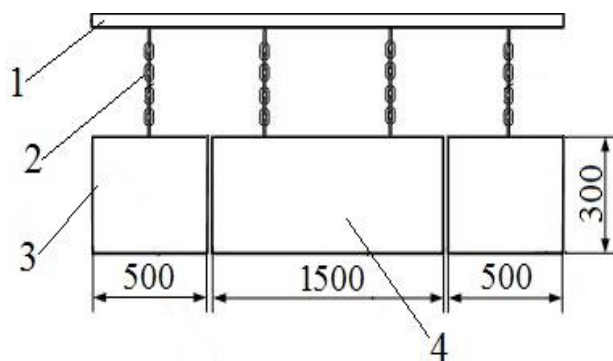


Рис. 10. Принципиальная схема секционной гладилки поверхности слоя аглошихты:  
1 – штанга для крепления цепных тяг;  
2 – цепные тяги, удерживающие секции гладилки; 3 – первые утяжеленные,  $170...200 \text{ кг/м}^2$ , секции гладилки для максимального выравнивания и уплотнения периферийных участков слоя шихты;  
4 – центральная облегченная секция,  $50...70 \text{ кг/м}^2$ , для заглаживания осевого участка слоя

### Выводы

По литературным данным, лабораторным и промышленным исследованиям определены и обоснованы параметры слоя высокоофлюсованной шихты, загружаемой на паллеты агломерационной машины.

В результате анализа показателей работы машин агломерационного цеха ЕМЗ доказано, что спекание высокоофлюсованной шихты в повышенных слоях высотой  $350...400 \text{ мм}$  способствует достижению необходимой прочности агломерата, характеризуемой содержанием класса  $0...5 \text{ мм}$  в скиповом агломерате не более  $15...17 \%$ .

При существующем способе загрузки комбинированным загрузочным устройством на паллетах формируется слой шихты, в периферийных зонах которого спекание шихты протекает быстрее, чем в осевой зоне. Для выравнивания скорости спекания по ширине агломерационной машины слой должен обладать идентичными гранулометрическим, химическим составами и газодинамическими свойствами. Формирование на паллетах слоя высокоофлюсованной шихты с вогнутопараболической формой поверхности и с высотой, увеличивающейся к бортам, способствует решению этой задачи.

Вероятность заплывания щелей колосниковой решетки жидкотекучим расплавом высокоофлюсованной шихты и образования склонного к силикатному распаду двукальциевого силиката  $\beta$ -модификации минимизируется путем рационального распределения грануло-



метрического состава шихты и твердого топлива по высоте слоя. Толщина слоя естественной защитной постели должна оставлять не менее 30...40 мм.

Вероятность сегрегации относительно крупных фракций твердого топлива в нижние горизонты слоя исключается его качественным измельчением (содержание фракции 0...3 мм не менее 93...95 %).

Выравнивание объемной плотности шихты верхней части слоя по ширине паллеты ведет к повышению прочности этой части спека, особенно в прибортовой зоне, что обеспечивает увеличение выхода годного продукта из спека и компенсацию потерь скорости спекания уплотненных слоев. Причем при формировании слоя с вогнутопараболической формой поверхности требуется приложение различных по ширине паллеты давлений для уплотнения шихты. Это возможно при обработке поверхности секционной гладилкой, конструкция которой позволяет регулировать давление периферийных секций путем применения навесных грузов.

Контроль эффективности регулирования объемной плотности шихты по ширине агломашины обеспечивается путем непрерывного автоматического измерения температуры отходящих газов в предпоследних вакуум-камерах агломашин в их трех точках: по оси агломашин и на расстоянии 250...300 мм от вертикальных линий правого и левого бортов паллет.

Таким образом, усовершенствованы представления о рациональных параметрах слоя высокоофлюсованной шихты, сформированного на паллетах агломашин. Полученные результаты исследований являются основой для разработки мероприятий по модернизации технологии загрузки шихты на агломерационную машину.

### Список литературы

1. Мищенко, И.М. Черная металлургия и охрана окружающей среды. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2012. – 446 с.
2. Андронов, В.Н. Минимально возможный расход кокса и влияние на него различных факторов доменной плавки. – СПб.: СПбГТУ, 2001. – 142 с.
3. Утков, В.А. Высокоосновный агломерат. – М.: Металлургия, 1977. – 156 с.
4. Совершенствование агломерационного процесса / Ф.Ф. Колесанов [и др.]. – К.: Техніка, 1983. – 110 с.
5. Влияние качества исходного сырья на проч-

ность высокоосновного агломерата / В.А. Утков [и др.] // Обогащение руд. – 1963. – №5. – С.33-38.

6. Предупреждение залипания колосников спекательных тележек агломерационных машин / И.М. Мищенко [и др.] // Черная металлургия. – 1985. – №10. – С. 47-49.
7. Kawasaki, M. Development of method for packing top layer of the sinter bed / CURR Adv. Mater. Fnd. proc. – 1990. – No.1. – P. 58.
8. Кривенко, С.В. Структура агломератов различной основности / С.В. Кривенко, Г.Г. Божков // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2014. – Вип. 28. – С. 31-37. (серія: технічні науки).
9. Тарасов, В.П. Свойства агломератов разной основности / В.П. Тарасов, С.В. Кривенко, Г.Г. Божков // Сталь. – 2015. – №1. – С. 2-5.
10. 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.
11. Iron Ore Sintering: Quality Indices / D. Fernández-González et al. // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. – 2017. – Vol.38. – P. 254-264.
12. Вегман, Е.Ф. Теория и технология агломерации. – М.: Металлургия, 1974. – 288 с.
13. Опыт производства высокоофлюсованного агломерата на агломерационной фабрике Енакиевского металлургического завода / И.М. Мищенко [и др.] // Черная металлургия. – 2018. – №12. – С. 33-45.
14. Исследование и совершенствование технологии загрузки шихты на паллеты агломерационных машин / И.М. Мищенко [и др.] // Научно-технический прогресс в черной металлургии-2019: Материалы IV Междунар. науч. конф. 18-20 сентября 2019 г., Череповец. – Череповец: ЧГУ, 2019. – С. 152-157.
15. A process model for uniform transverse distribution in a sinter plant / S. Mitra, M. Gangadaran, M.T. Raj et al. // Steel Time International. – 2005. – No.5. – P. 17-18.
16. Фролов, Ю.А. Агломерация: технология, теплотехника, управление, экология. – Москва: Металлургиздат, 2016. – 672 с.
17. Сигов, А.А. Агломерационный процесс / А.А. Сигов, В.А. Шурхал. – К.: Техніка, 1969. – 232 с.
18. Исследование процесса агломерации с использованием информации новой АСУ ТП агломерационной машины АКМ-312 ОАО «НЛМК» / Ю.А. Фролов [и др.] // Сталь. – 2010. – №5. – С. 24-29.

I.M. Mishchenko /Cand. Sci. (Eng.), Ya.Yu. Aslamova, A.V. Kuzin /Cand. Sci. (Eng.)/

Donetsk National Technical University (Donetsk)

N.N. Korobkin, A.V. Polohin

Branch No. 2 «Enakievo Metallurgical Plant» CJSC «Vneshtorgservice» (Enakievo)

## SUBSTANTIATION OF RATIONAL PARAMETERS OF HIGH-FLUXED CHARGE LAYER FORMED ON PALLETS OF AN AGGLOMERATION MACHINE

**Background.** It is possible to improve the quality indicators of high-fluxed agglomerate and the productivity of sintering machines by improving the technology of preparation and sintering of the charge. Loading the charge onto sinter machine pallets is the final stage of preparation. The efficiency of sintering depends on it in many ways. Determining and justifying the rational parameters of the sintered layer formed on pallets will allow developing recommendations for upgrading the technology for loading high-fluxed charge.

**Materials and/or methods.** To obtain data on the behavior characteristics of the charge at all stages of reloading operations and to study the gas permeability of the layer along the width of the pallet, laboratory and industrial studies were conducted using original methods. Sieve analysis of wet charge was performed using a unique technique that excludes significant loss of charge humidity and its destruction during sieving on wire sieves.

**Results.** Analysis of data from industrial research carried out in the agglomeration shop of the Yenakiyev metallurgical plant allowed formulating rational parameters of the high-fluxed charge layer formed on pallets. These parameters are:

- the height of the layer of high-fluxed charge on pallets is not less than 300...350 mm;
- identical granulometric, chemical compositions and gas dynamic properties of the charge layer along the width of the agglomeration machine;
- rational distribution of the particle size of the charge and solid fuel by layer height;
- stabilization of the bulk density of the charge in the height and width of the layer.

**Conclusion.** The choice of the rational parameters of the high-fluxed charge layer allows ensuring optimal gas-dynamic and temperature-thermal modes of sintering, achieving the set indicators for the volume of production and quality of the sinter. Justification for the specific production conditions of the layer parameters makes it possible to develop measures to modernize the technology of loading high-fluxed charge on the sintering machine.

**Keywords:** agglomerate, high-fluxed charge, layer height, granulometric composition, fuel, bulk density.

### Сведения об авторах

**И.М. Мищенко**

Телефон: +380 (71) 412-25-04

Эл. почта: mim37@mail.ru

**А.В. Кузин**

SPIN-код: 4470-0976

Author ID: 7102276525

Researcher ID: P-8105-2015

ORCID iD: 0000-0002-5369-433

Телефон: +380 (62) 310-08-42

Эл. почта: yarosh@fizmet.donntu.org

**А.В. Полохин**

Телефон: +380 (62) 529-30-55

Эл. почта: Andrey.Polokhin@emzsteel.com

**Я.Ю. Асламова**

SPIN-код: 4394-4216

Телефон: +380 (71) 398-60-39

Эл. почта: aslamova\_yana@mail.ru

**Н.Н. Коробкин**

Телефон: +380 (62) 529-22-31

Эл. почта: Nikolay.Korobkin@emzsteel.com

*Статья поступила 19.03.2020 г.*

*© И.М. Мищенко, Я.Ю. Асламова, А.В. Кузин,*

*Н.Н. Коробкин, А.В. Полохин, 2020*

*Рецензент д.т.н., проф. А.Б. Бирюков*