

УДК 669.162.262

к.т.н. Русанов И. Ф.,  
к.т.н. Куберский С. В.,  
Лупанов Д. В.

(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР, rusanova-2011@inbox.ru)

## ОЦЕНКА УСЛОВИЙ СПЕКАНИЯ АГЛОМЕРАТА У БОРТОВ СПЕКАТЕЛЬНЫХ ТЕЛЕЖЕК КОНВЕЙЕРНЫХ АГЛОМАШИН

На основании экспериментальных данных сделана оценка газодинамических параметров слоя шихты и особенностей теплообмена в нём по ширине агломашины. Показано, что у бортов спекательных тележек формируется слой крупной и однородной шихты, что приводит к увеличенной скорости движения газа в этой части агломерационной машины. Неравномерность распределения шихты по ширине машины и повышенная газопроницаемость слоя у бортов тележек приводят к изменению теплового баланса процесса спекания. В результате агломерат спекается при температуре на 100–200°C меньше требуемой для получения качественного сырья.

**Ключевые слова:** газодинамика, средний размер кусков, коэффициент вариации размера кусков, температура спекания, качество агломерата.

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** Общеизвестно, что условия спекания агломерата на современных агломерационных машинах по их ширине неодинаковы: около бортов спекательных тележек располагается шихта с повышенной газопроницаемостью, что приводит к повышению скорости движения газа и снижению температуры, при которой спекается агломерат в этой зоне. Однако причины и их качественное и количественное влияние на процесс агломерации изучены недостаточно полно. В связи с этим разработка методов улучшения условий спекания агломерата у бортов спекательных тележек производится интуитивно. Для обоснованного же выбора методов воздействия на ход спекания у бортов тележек необходимо дальнейшее изучение газодинамики и теплообмена в этой части машины.

**Постановка задачи.** В работе поставлена следующая задача: на основании опытных данных оценить газодинамические условия спекания агломерата по ширине агломашины и обосновать образование агломерата пониженного качества у бортов спекательных тележек.

**Изложение материала и его результаты.** Загрузка шихты на современные агло-

мерационные машины производится системой, состоящей из челнокового распределителя шихты, промежуточного бункера, барабанного питателя и загрузочного лотка. Шихта из барабана-окомкователя выдаётся на челноковый распределитель, который равномерно загружает её в промежуточный бункер над агломашиной. Выдача шихты из промежуточного бункера и укладка её на спекательные тележки производится с помощью барабанного питателя и загрузочного лотка.

При такой системе загрузки шихты на агломашину имеет место развитие сегрегации шихты не только по высоте слоя, но и по ширине спекательной тележки. Как установили авторы работы [1] при проведении исследований на аглофабрике комбината «Запорожсталь», в центральной части спекательной тележки сосредотачиваются в большей степени мелкие фракции шихты крупностью 3,5–6,0 и 0–3,5 мм. Крупные фракции размером более 6,0 мм в значительном количестве сосредоточены у бортов тележек. Их содержание в шихте при бортовой зоны составляет 40 % и более. Такое распределение шихты по крупности приводит к тому, что содержание  $Fe_{общ}$  в шихте у бортов выше, а содержание угле-

рода ниже, чем в основной массе шихты. Основность шихты по ширине спекательной тележки изменяется так же, как и содержание углерода в шихте, — у бортов она ниже, чем в остальной части. По данным авторов, содержание железа в крупных фракциях в 1,14 раза выше, содержание углерода в 3–5 раз ниже, а индекс основности в 2–7 раз ниже, чем в мелких.

В результате проведенных исследований на аглофабрике НКГОКа авторами работы [2] также установлено, что средне-массовый диаметр кусков шихты у бортов в 1,1–1,3 раза выше, чем в основной массе. Изменение содержания углерода в шихте и индекса основности, по данным авторов, аналогично описанному выше.

Такое распределение материалов приводит к тому, что в прибортовой зоне слой имеет повышенную газопроницаемость при низком содержании углерода в нём.

К тому же на газодинамическое сопротивление слоя в прибортовой зоне оказывает влияние так называемый пристеночный эффект. Суть его заключается в том, что газопроницаемость слоя полифракционных материалов около стен значительно выше, чем слоёв, удалённых от стен. В результате повышенной газопроницаемости прибортового слоя шихты (его ширина составляет 50–100 мм, или 2–4 % от общей ширины спекаемого слоя) скорость движения воздуха и газов в нём в 1,2–1,5 раза выше средней скорости их движения во всём слое. При такой скорости газов условия протекания всех физико-химических и тепловых процессов далеки от оптимальных. В результате спечённый агломерат прибортовой зоны имеет низкое качество [3].

Повышенная газопроницаемость слоя шихты приводит к нерациональному использованию просасываемого воздуха. Поэтому значительное количество этого воздуха относят к вредным прососам. На действующих агломерационных машинах они составляют 40–60 % от общего количества газов, отсасываемых эксгаустером. Значительную часть общего количества просо-

сов составляют прососы через слой шихты, лежащей у бортов спекательных тележек. По нашим оценкам они составляют примерно 15–20 %.

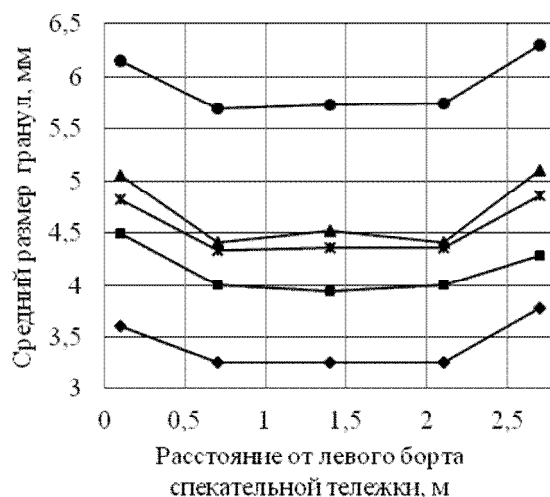
Пониженное содержание углерода в прибортовом слое и увеличенное количество воздуха, просасываемого через этот слой, приводят к изменению теплового баланса процесса спекания агломерата. В приходной части баланса уменьшается количество тепла, выделяемого при сгорании топлива. В расходной части баланса увеличивается количество тепла, уносимого отходящими газами. В результате слой получает меньше тепла, чем необходимо для получения качественного агломерата.

Согласно теории и основным закономерностям спекания агломерата производительность аглоустановки при постоянном вакууме практически полностью определяется газопроницаемостью агломерируемого слоя, которая в первую очередь зависит от гранулометрического состава окомкованной шихты. Как отмечалось выше, гранулометрический состав шихты как по ширине агломашины, так и по высоте слоя неодинаков. Распределение отдельных фракций по поперечному сечению слоя шихты определяется, с одной стороны, исходным ситовым составом шихты, с другой — конструкцией и режимом работы загрузочного устройства. На разных аглофабриках условия формирования слоя на агломашине различны, что затрудняет оценку газодинамики спекания агломерата в конкретных условиях с использованием установленных к настоящему времени закономерностей.

С целью исследования распределения отдельных фракций шихты по поперечному сечению её слоя на агломашине Алчевского меткомбината отбирались пробы из пяти отсеков шириной 200 мм. Центры бортовых отсеков располагались на расстоянии 100 мм от бортов, центр отсека, расположенного посередине, совпадал с продольной осью машины, а центры двух отсеков отстояли от бортов тележки на 700 мм. Отбор проб производился специальным пробоот-

борником, конструкция которого позволяла делить отобранную из отсека пробу на четыре равные части по высоте слоя. Каждая проба рассеивалась на ситах с размером квадратной ячейки 3, 4, 5, 10 и 15 мм. По результатам рассева четырёх проб одного отсека рассчитывался общий ситовый состав шихты в отсеке. Всего было проведено четыре таких исследования, в результате которых было сделано 80 рассевов шихты.

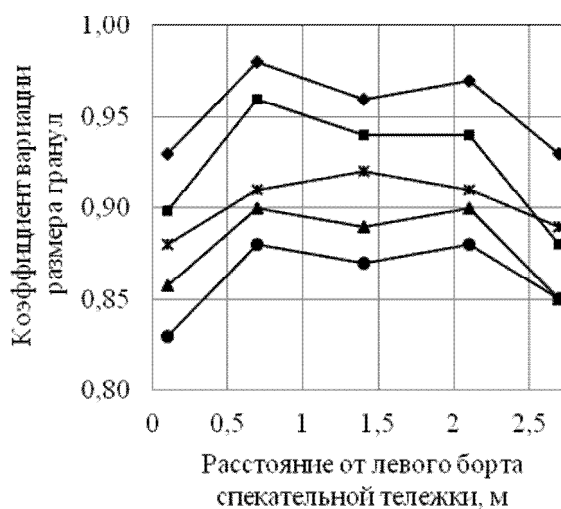
Для всех отобранных проб шихты, в соответствии с рекомендациями авторов работы [4], рассчитывались обобщённые характеристики ситового состава всех проб: средний размер кусков материала и коэффициент вариации размера кусков. Вычисления проводились по функции распределения Вейбулла, описывающей данный ситовый состав. При этом средний размер кусков материала определял его среднюю крупность, а коэффициент вариации размера кусков — его однородность. На рисунках 1 и 2 приведены кривые, показывающие изменение вычисленных обобщённых характеристик ситового состава по ширине агломашины.



Номера слоев от поверхности шихты на агломашине:

- ◆ 1-й слой
- 2-й слой
- ▲ 3-й слой
- 4-й слой
- \* — средний по отсеку

Рисунок 1 Изменение среднего размера гранул шихты по высоте и ширине агломашины



Номера слоев от поверхности шихты на агломашине:

- ◆ 1-й слой
- 2-й слой
- ▲ 3-й слой
- 4-й слой
- \* — средний по отсеку

Рисунок 2 Изменение коэффициента вариации размера гранул шихты по высоте и ширине агломашины

Как следует из анализа графиков рисунка 1, средний размер гранул во всех отсеках от поверхности шихты к колосниковой решётке возрастал. Это явилось проявлением сегрегации шихты по высоте слоя при её загрузке на агломашину.

В то же время разница между средними размерами гранул в верхнем и нижнем слоях по ширине машины неодинакова. В центральной части машины средний размер гранул в нижнем слое возрос в 1,74–1,77 раза, а у бортов — в 1,67–1,71 раза. Отмеченная закономерность является следствием того, что у бортов средний размер гранул выше, чем в центральной части машины, и здесь сегрегация развита в меньшей степени.

По полученным данным средний размер гранул у бортов тележки на всех горизонтах больше, чем в центральных отсеках, в среднем в 1,1 раза.

Приведённые на рисунке 2 кривые изменения коэффициента вариации размера гранул по ширине машины, а также для различных слоёв шихты от её поверхности

показывают, что чем ниже расположен слой шихты, тем он более однороден по крупности. Коэффициент вариации размера гранул в верхних слоях равен 0,93–0,98, а в нижних — 0,83–0,87. Из анализа полученных данных также следует, что у бортов спекательных тележек формируется слой более однородный по крупности, чем в остальной части агломашины, — коэффициент вариации размера гранул в этой зоне на 0,03–0,05 меньше.

В целом проведённые эксперименты показывают, что слой шихты, расположенный около бортов, имеет повышенную среднюю крупность и он более однороден по крупности гранул. Такой слой имеет пониженное газодинамическое сопротивление.

На рисунке 3 приведены кривые, характеризующие распределение скоростей движения газа по ширине спекательной тележки, вычисленные по изложенной в работе [5] методике и полученные прямым замером анемометром во время проведения исследований при вакууме 6,6 кПа.

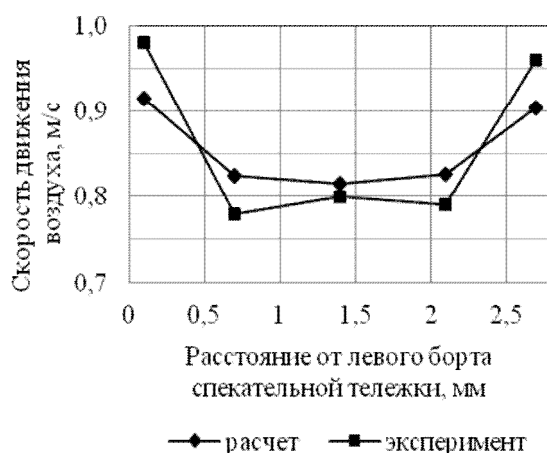


Рисунок 3 Распределение скоростей движения воздуха по ширине агломашины

Анализ приведённых кривых показывает, что в результате расположения у бортов тележек крупной и однородной шихты скорость движения воздуха в этих зонах значительно выше, чем в остальной части агломашины. По расчётным данным здесь скорость выше на 12–15 %, а по опытным дан-

ными — на 20–25 %. Такое расхождение вызвано тем, что при расчёте не учитывалось проявление пристеночного эффекта, при котором воздух у стен проходит с большей скоростью из-за того, что каналы здесь с одной стороны имеют гладкую поверхность.

Неравномерность распределения шихты по крупности по ширине агломашины приводит к перераспределению топлива в различных зонах слоя. Связано это с тем, что, как установлено во многих исследованиях, содержание топлива (углерода) в гранулах разного размера не одинаково. В мелких гранулах размером до 5 мм сосредоточено около 60–70 % всего углерода шихты. Обработкой данных из научной литературы и данных, полученных авторами, установлено, что распределение углерода по гранулам при общем его содержании в шихте, равном около 4 %, удовлетворительно описывается уравнением

$$C_{gp} = C_{шхх} \cdot \left( \frac{14,8}{d} + 0,7 \right), \quad (1)$$

где  $C_{gp}$  и  $C_{шхх}$  — содержание углерода в гранулах размером  $d$  и в шихте соответственно, %.

Теснота связи величин  $C_{gp}$  и  $C_{шхх}$  характеризуется коэффициентом корреляции, равным 0,97.

Проведённые на основе уравнения (1) расчёты позволили оценить влияние ситового состава шихты на распределение углерода в слое по высоте загрузки её на агломашину в центральной части и у бортов спекательных тележек. Расчётное распределение углерода представлено на рисунке 4.

Как следует из анализа полученных данных, разница между содержанием углерода у бортов спекательных тележек по всей высоте слоя на 0,15–0,20 % меньше, чем в центральной части.

Простой расчёт показывает, что в слой у каждого борта спекательной тележки шириной 0,2 м от горения топлива вносится на 300–350 кДж тепла меньше, чем в такой же слой остальной её части.

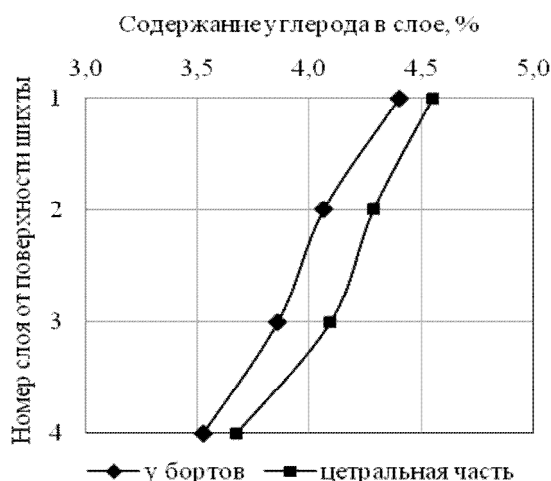


Рисунок 4 Распределение углерода по высоте слоя шихты на агломашине

Такое уменьшение прихода тепла практически не влияет на максимальную температуру спекания — она может снизиться всего на 3–4 °С.

В то же время на значение максимальной температуры в слое оказывает влияние скорость фильтрации воздуха.

Механизм этого влияния следующий.

В верхней ступени теплообмена, где происходит нагрев воздуха и за счёт охлаждения спека, при увеличении скорости просачивания воздуха он нагревается в меньшей степени и, соответственно, в зону горения приносит меньше тепла. Это приводит к снижению температуры в зоне горения.

В нижней ступени теплообмена происходит передача тепла от газов шихте. Уве-

личение скорости фильтрации воздуха приводит здесь к распространению тепловой волны вглубь слоя. В результате уровень максимальных температур на разных горизонтах слоя снижается.

В результате проведенных расчётов и лабораторных спеканий установлено, что максимальная температура в слое у бортов спекательных тележек на 100–200 °С ниже оптимальной для получения качественного агломерата.

**Выводы и направление дальнейших исследований.** В результате проведённых экспериментов и расчётов установлено, что скорость движения воздуха у бортов спекательных тележек на 15–20 % выше, чем в центральной части агломашины. Вызвано это тем, что у бортов располагается более крупная и однородная шихта. Перераспределение при этом углерода не приводит к снижению максимальной температуры спекания. Однако увеличение скорости фильтрации воздуха через слой приводит к снижению максимальной температуры в слое на всех горизонтах на 100–200 °С. Такое снижение температуры не позволяет спекать у бортов качественный агломерат.

Проведённая оценка условий спекания агломерата у бортов спекательных тележек позволит в дальнейшем обосновывать те или иные мероприятия, направленные на повышение качества агломерата.

### Библиографический список

1. Кравец, Ю. С. Повышение качества агломерата за счёт улучшения условий загрузки агломашин [Текст] / Ю. С. Кравец, Ю. П. Исаенко, А. А. Вовк, П. М. Челгий, Б. А. Лифшиц, А. М. Локтев // *Металлургия и коксохимия*. — 1977. — Выпуск 53. — С. 14–19.
2. Вовк, А. А. Изучение распределения гранул окомкованной шихты при загрузке на спекательные тележки [Текст] / А. А. Вовк, П. М. Челгий, В. Е. Шешетов, В. П. Маймур, В. Д. Кучукаенко // *Металлургия и коксохимия*. — 1982. — Выпуск 75. — С. 8–11.
3. Петрушов, С. Н. Спекание агломерата с вводом в прибортовой слой чугуновой стружки [Текст] / С. Н. Петрушов, И. Ф. Русанов, С. В. Куберский, Д. В. Лупанов // *Сборник научн. трудов ДонГТУ*. — Алчевск : ДонГТУ, 2011. — Выпуск 34. — С. 99–105.
4. Русаков, П. Г. Обобщённые характеристики ситового состава неоднородного сыпучего материала [Текст] / П. Г. Русаков, И. Ф. Русанов // *Заводская лаборатория*. — 1990. — № 2. — С. 68–69.

5. Русанов, И. Ф. Влияние гранулометрического состава полифракционного сыпучего материала на газодинамическое сопротивление слоя [Текст] / И. Ф. Русанов, Н. И. Русанова // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2016. — № 47. — С. 69–73.

© Русанов И. Ф.

© Куберский С. В.

© Лупанов Д. В.

**Рекомендована к печати к.т.н., доц., зав. каф. ОМДиМ ДонГТУ Денищенко П. Н.,  
зам. нач. ККЦ по технологии филиала № 12 ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС» Швец Д. В.**

Статья поступила в редакцию 01.03.19.

**к.т.н. Русанов И. Ф., к.т.н. Куберский С. В., Лупанов Д. В. (ДонГТУ, м. Алчевськ, ЛНР)  
ОЦІНКА УМОВ СПІКАННЯ АГЛОМЕРАТУ БІЛЯ БОРТІВ СПІКАЛЬНИХ ВІЗКІВ  
КОНВЕЄРНИХ АГЛОМАШИН**

*На підставі експериментальних даних зроблено оцінку газодинамічних параметрів шару шихти і особливостей теплообміну в ньому по ширині агломашини. Показано, що біля бортів спікальних візків формується шар крупної та однорідної шихти, що приводить до збільшеної швидкості руху газу в цій частині агломераційної машини. Нерівномірність розподілу шихти по ширині машини і підвищена газопроникність шару біля бортів візків приводять до зміни теплового балансу процесу спікання. У результаті агломерат спікається при температурі на 100–200 °С менше необхідної для одержання якісного агломерату.*

**Ключові слова:** газодинаміка, середній розмір шматків, коефіцієнт варіації розміру шматків, температура спікання, якість агломерату.

**PhD Rusanov I. F., PhD Kuberskiy S. V., Lupanov D. V. (DonSTU, Alchevsk, LPR)  
ASSESSMENT OF THE AGGLOMERATE SINTERING CONDITIONS AT THE SIDE  
SURFACE OF PELLET CARS OF THE CONVEYOR SINTERING MACHINE**

*Based on the experimental data, the gas-dynamic parameters of the charge layer and the heat transfer characteristics in it across the width of the sintering machine were assessed. It has been shown that a coarse and homogeneous charge layer is formed near the side surfaces of pellet cars resulting in an increased gas velocity in this part of the sintering machine. The uneven distribution of the charge across the width of the machine and the increased gas permeability of the layer at the sides of the cars lead to a variation in the heat balance of sintering process. As a result, the agglomerate is sintered at a temperature 100–200 °C less than is required to obtain high-quality sinter.*

**Key words:** gas dynamics, average size of grains, coefficient of grain size variation, sintering temperature, sinter quality.