

Мных А. С.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ СЛОЯ АГЛОШИХТЫ ПОДГОТОВЛЕННОЙ К ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКЕ

*В работе, на примере системы питатель — прямолинейный загрузочный лоток, проведено исследование динамики процесса формирования слоя полидисперсного шихтового материала, загружаемого на паллеты агломерационной машины.*

*Автором предложена методика, позволяющая рассчитать распределение фракционного состава шихты по высоте слоя, и установлен диапазон изменения параметров рассматриваемого лотка, для его эффективной работы.*

**Ключевые слова:** сегрегация, агломерация, загрузочный лоток, тепловой режим, горизонт слоя, шихта.

## 1. Введение

Энергоэффективность и производительность агло-процесса существенно зависят от теплового режима спекания шихтовых материалов, который обусловлен характером распределения твердого топлива и химических компонентов по высоте слоя. Последнее зависит от особенностей загрузки и сегрегации фракций материала по горизонтам шихты, подготовленной к спеканию.

Загрузка шихты, в свою очередь, зависит от типа загрузочного устройства, конструктивные особенности которого будут влиять на процесс формирования слоя материала, и как следствие, на фракционный состав отдельных горизонтов уложенной на паллеты шихты. Этим обосновывается актуальность данного исследования.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В настоящее время существует более 20 систем и устройств по регулированию и управлению подачей и укладкой шихты на агломерационную ленту. В работе [1] приводится способ загрузки шихты на спекательные тележки путем использования энергии сжатого воздуха. Обработка шихты воздухом при загрузке, приводит к сегрегации частиц по крупности, а так же к перераспределению по высоте слоя топлива и известняка. Пневматическая система загрузки позволяет получить слой шихты с более рыхлой структурой. Однако подобная система значительно усложняет загрузочный узел агломашин, затрудняет условия работы агломератчиков из-за повышенной запыленности. К тому же происходит подсушивание гранул шихты, что увеличивает унос частиц твердого топлива, фракционный состав которого составляет порядка 0,5–1 мм.

Предложенная в работе [2] замена наклонного отражательного листа на грохот с переменным сечением отверстий, призвана повысить степень сегрегации шихты. Тем не менее, помимо сложности предложенной конструкции, для работоспособности данного загрузочного

устройства необходима постоянная очистка валков в связи с налипанием на них частиц шихты. Загрузочное устройство подобной конструкции пригодно для эксплуатации только при производстве железорудных окатышей.

Многочисленные модификации загрузочных устройств приведены в работах [3–6]. В них предлагается усилить сегрегацию шихты с помощью различных приспособлений в виде дополнительного барабана и загрузочного лотка, дополнительного транспортера, устанавливаемого вместо отражательного листа, барабана после отражательного листа и другие.

Заслуживает внимания приспособление для усиления сегрегации по высоте, которое представляет собой подпружиненную направляющую балку с закрепленным на ней очистным ножом выгнутой вниз формы. Однако на практике описанные загрузочные устройства не применяются. Существенным недостатком таких загрузочных устройств является то, что они имеют только одну степень свободы. Угол наклона загрузочного лотка, даже с модификациями, связан с высотой слоя шихты синусоидальной зависимостью. Увеличение высоты слоя шихты до 0,40 м приводит к уменьшению угла наклона загрузочного лотка до 38,6°, в то время как угол естественного откоса подготовленной к спеканию шихты составляет 39–45°. Поэтому регулировать степень сегрегации шихты с помощью таких загрузочных систем практически невозможно.

Анализ динамики сегрегационных процессов протекающих при формировании слоя шихты в результате использования загрузочных устройств различного типа проводился в работах [7, 8].

Результаты моделирования теплового режима процесса спекания [9] позволили сделать вывод, что создание направленной сегрегации гранулометрического состава шихты по высоте слоя позволит обеспечить требуемое распределение топлива и химкомпонентов, тем самым стабилизировать температуру зоны горения. Последнее направлено на повышение производительности агломашин при условии сокращения расхода твердого топлива и повышения прочности агломерата.

Таким образом, исследование динамики процесса формирования слоя полидисперсного сыпучего материала является актуальной научной и практической задачей.

### 3. Объект, цель и задачи исследования

Объект исследования — оценка распределения фракционного состава материала.

Целью данной работы является определение распределения фракционного состава полидисперсной агломерационной шихты, подготовленной к спеканию, при использовании для загрузки материала прямолинейного загрузочного лотка.

Для достижения поставленной цели необходимо:

- разработать методику расчета траектории движения частиц шихтового материала по загрузочному лотку выбранной конструкции;
- определить граничные условия эффективного использования прямолинейного лотка;
- рассчитать распределение фракций материала по высоте слоя, для условия загрузки материала прямолинейным загрузочным лотком.

### 4. Результаты расчета фракционного состава полидисперсной шихты по горизонтам загружаемого материала

Формирование слоя агломерируемого материала в производственных условиях осуществляется с помощью системы, состоящей из вибрационного либо барабанного питателя в совокупности с загрузочным лотком. Сыпучий материал,двигающийся по поверхности загрузочного лотка и откошу слоя под действием гравитационных сил, представляет собой совокупность частиц, форма которых близка к сферической, рис. 1.

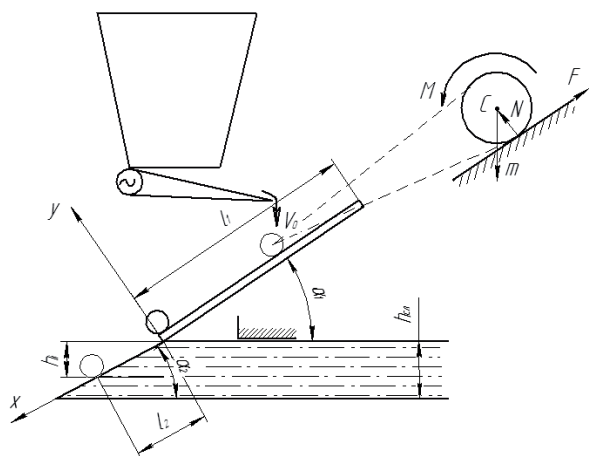


Рис. 1. Схема загрузки шихты при использовании прямолинейного лотка

Указанная схема загрузки агломерационной шихты обеспечивает расслоение материала по крупности. В результате мелкие частицы преимущественно сосредотачиваются в верхних горизонтах, а крупные скатываются к основанию формирующегося слоя. В связи с тем, что степень разрыхления движущегося по лотку сыпучего материала значительна, особенно при использовании вибрационного питателя, этот поток можно рассматри-

вать как совокупность отдельных частиц, достаточно свободно перемещающихся по наклонной плоскости.

Исходя из того, что отдельную частицу шихты с достаточной степенью приближения будем рассматривать как шар, свободнодвигающийся по наклонной плоскости, дифференциальное уравнение плоского движения примет вид:

$$\begin{cases} \frac{m}{q} \cdot \frac{d^2 x_c}{dt^2} = m \sin \alpha - F, \\ \frac{m}{q} \cdot \frac{d^2 y_c}{dt^2} = m \cos \alpha - N, \\ I_z \cdot \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = F \cdot r - M, \end{cases} \quad (1)$$

где  $x_c, y_c$  — координаты центра тяжести частицы, м;  $r$  — радиус частицы, м;  $m$  — вес частицы, Н;  $N = m \cos \alpha$  — нормальная реакция наклонной плоскости, Н;  $F$  — сила трения, Н;  $\varphi$  — угол поворота частицы, рад;  $\alpha$  — угол наклона лотка, рад;  $I_z$  — момент инерции тела относительно центральной оси;  $q$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $M = m \cos \alpha \cdot r \cdot f'$  — момент трения качения, Н·м;  $f'$  — коэффициент трения качения частицы по стальному лотку.

Движение частицы может осуществляться в нескольких режимах: качение, скольжение, качение со скольжением. Будем рассматривать движение частицы в режиме чистого качения, так как только в этом режиме происходит разделение частиц различного размера по скорости их схода с загрузочного лотка, тем самым обеспечивая сегрегацию материала по классам крупности.

При условии качения частицы без скольжения, точка ее соприкосновения с лотком является мгновенным центром скоростей. Обозначив угловую скорость частицы через  $\omega$ , получим:

$$V_c = r\omega,$$

где  $V_c$  — скорость движения центра частицы шихты, м/с. Отсюда:

$$\frac{dx_c}{dt} = r \frac{d\varphi}{dt},$$

или

$$\frac{d^2 x_c}{dt^2} = r \frac{d^2 \varphi}{dt^2}.$$

Так как движение частицы плоское  $\left(\frac{d^2 y_c}{dt^2} = 0\right)$  из системы уравнений (1) найдем  $F$ :

$$F = m(\mu \sin \alpha_1 + f' \nu \cos \alpha_1), \quad (2)$$

где  $\mu$  — коэффициент формы частицы для шара  $\mu = \frac{\rho^2}{\rho^2 + r^2} = \frac{2}{7}$  [7];  $\nu = 1 - \mu$ , для шара  $\nu = \frac{5}{7}$ ;  $\rho$  — радиус инерции частицы, м.

Подставив (2) в уравнение системы (1), получим:

$$\frac{d^2x_c}{dt^2} = qv(\sin \alpha_1 - f' \cos \alpha_1). \quad (3)$$

Проинтегрировав обе части уравнения (3), получим мгновенную скорость движения частицы по наклонной плоскости:

$$\frac{dx_c}{dt} = qv(\sin \alpha_1 - f' \cos \alpha_1)t + V_0, \quad (4)$$

где  $V_0$  — начальная скорость движения частицы, м/с. Длина пути отдельной частицы составит:

$$x_c = \frac{qv(\sin \alpha_1 - f' \cos \alpha_1)t^2 + V_0t}{2}. \quad (5)$$

Зная длину пути частицы по лотку,  $x_c = l_1$ , решим уравнение (5) относительно  $t$  и определим время качения частицы шихты по наклонной плоскости:

$$t = \frac{-2V_0 + \sqrt{4V_0^2 + 8qv l_1(\sin \alpha_1 - f' \cos \alpha_1)}}{2qv(\sin \alpha_1 - f' \cos \alpha_1)}. \quad (6)$$

Подставив значение  $t$  в (4), найдем конечную скорость качения частицы по лотку длиной  $l_1$ :

$$V = \sqrt{2ql_1v(\sin \alpha_1 - f' \cos \alpha_1) + V_0^2}. \quad (7)$$

Приведенный случай чистого качения частицы по наклонной плоскости может быть рассмотрен только при соблюдении условия:

$$m(\mu \sin \alpha + f'v \cos \alpha) \leq mf \cos \alpha, \quad (8)$$

где  $f$  — коэффициент трения скольжения частицы по лотку.

Значения коэффициентов  $f$ ,  $f'$  получены экспериментально [10].

Из уравнения (8) получим:

$$\operatorname{tg} \alpha \leq \frac{f - f'v}{\mu}. \quad (9)$$

В режиме равноускоренного движения  $\frac{d^2x_c}{dt^2} > 0$ , тогда

из (3) получим:

$$f' < \operatorname{tg} \alpha. \quad (10)$$

Исходя из ограничений (9), (10), можно сделать вывод, что режим чистого качения шарообразной частицы по лотку, может иметь место при условии:

$$f' < \operatorname{tg} \alpha < \frac{f - f'v}{\mu}. \quad (11)$$

Если  $\operatorname{tg} \alpha > \frac{f - f'v}{\mu}$ , то качение частицы шихтово-

го материала сопровождается скольжением, тем самым нарушая сегрегационные процессы в слое материала, подготовленного к спеканию.

После схода частиц с загрузочного лотка, они будут двигаться по поверхности откоса слоя с углом наклона  $\alpha_2$ . Для случая чистого качения частицы по поверхности загрузочного лотка и откоса слоя материала, конечная скорость ее движения составит:

$$V = \sqrt{2ql_2v(\sin \alpha_2 - f'_2 \cos \alpha_2) + 2ql_1v(\sin \alpha_1 - f'_1 \cos \alpha_1) + V_0^2}, \quad (12)$$

где  $l_1, l_2$  — путь пройденный частицей по поверхности лотка и материала, м;  $f'_1, f'_2$  — коэффициент трения качения по поверхности лотка и откосу материала.

Учитывая, что расстояние между краем рабочего органа питателя и поверхностью лотка незначительна, можно условно принять  $V_0 = 0$ . Для определения распределения различных фракций материала по горизонтам, необходимо рассчитать длину пути, которую проходит  $i$ -я частица по поверхности откоса формирующегося слоя. Приняв условие, что  $V_i = 0$  в момент остановки отдельной частицы на поверхности откоса, получим:

$$2ql_2v(\sin \alpha_2 - f'_2 \cos \alpha_2) + 2ql_1v(\sin \alpha_1 - f'_1 \cos \alpha_1) = 0. \quad (13)$$

Решив (13) относительно  $l_2$ , получим путь, пройденный отдельной частицей по поверхности формирующегося слоя:

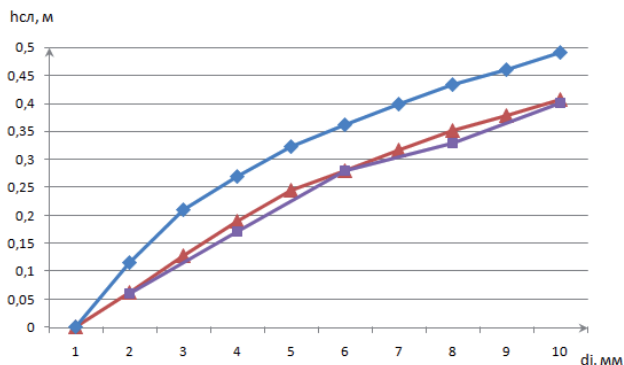
$$l_2 = \frac{l_1(\sin \alpha_1 - f'_1 \cos \alpha_1)}{f'_2 \cos \alpha_2 - \sin \alpha_2}. \quad (14)$$

Приняв, что  $h_i = l_2 \cos \alpha_2$ , запишем уравнение, характеризующее распределение частиц по высоте слоя:

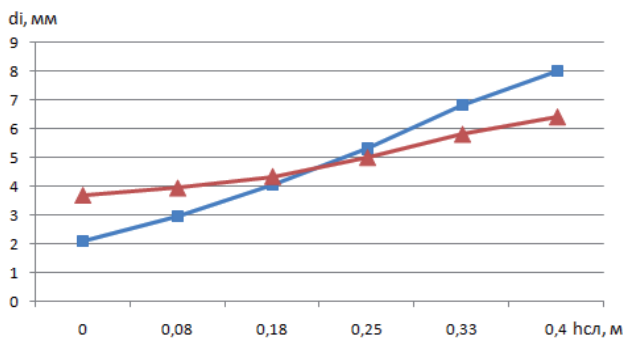
$$h_i = \frac{l_1(\sin \alpha_1 - f'_1 \cos \alpha_1) \sin \alpha_2}{f'_2 \cos \alpha_2 - \sin \alpha_2}.$$

Таким образом, зная скорость схода  $i$ -й частицы шихты с загрузочного лотка, которая зависит от ее размера, и соответствующего ей коэффициента трения, можно определить дальность качения частицы. Результаты расчетов распределения фракционного состава шихты по высоте слоя с применением прямолинейного лотка представлены на рис. 2.

Данные о реальном распределении фракционного состава сыпучего материала, кривая 2, были получены экспериментально, путем рассева проб шихты подготовленной при спеканию при загрузке прямолинейным лотком, совместно с вибрационным и барабанным питателем, агломашины № 4 и № 2 МК «Запорожсталь» соответственно, рис. 3.



**Рис. 2.** Результаты расчетов фракционного состава по высоте слоя: — результаты расчетов, слой 400 мм; — эксперимент, слой 400 мм; — результаты расчетов, слой 500 мм



**Рис. 3.** Изменение фракционного состава шихты по высоте при различных способах загрузки: — вибрационный питатель; — барабанный питатель

При сравнении кривых 1 и 2 рис. 2, можно сделать вывод о хорошей сходимости экспериментальных и расчетных данных. Угол наклона загрузочного лотка  $\alpha_1$  для случая формирования слоя шихты высотой 400 мм составил  $51^\circ$ . Однако в настоящее время на комбинате переходят к спеканию шихты в более высоких слоях до 500 мм. Для формирования слоя такой высоты, кривая 3 рис. 2, необходимо увеличить угол наклона загрузочного лотка до  $57^\circ$ . Следует заметить, что при таком угле наклона не соблюдается условие (11) и режим угления частицы переходит от чистого качения к качению со скольжением, что не позволяет обеспечить необходимую сегрегацию классов крупности шихтового материала.

## 6. Выводы

В результате проведенных исследований:

1. В работе исследована динамика процесса формирования слоя полидисперсного сыпучего материала подготовленного к спеканию. Рассмотрен случай загрузки шихты системами вибрационный питатель — прямолинейный лоток и барабанный питатель — прямолинейный лоток, получены зависимости, позволяющие определить распределение фракционного состава шихты по высоте слоя.

2. Определены ограничения, обуславливающие режим движения частицы шихты, и установлено, что для условий формирования высокого слоя, 500 мм и более, применение прямолинейного загрузочного лотка не позволяет обеспечить требуемое разделение классов крупности материала по высоте паллеты.

3. Установлено, что необходимо провести дальнейшее исследование и выбор системы загрузки аглошихты с целью обеспечения требуемого теплового режима процесса спекания [11].

## Литература

- Бережной, Н. Н. Анализ способов и систем загрузки агломерационных и обжиговых машин конвейерного типа [Текст]: зб. наук. пр. / Н. Н. Бережной, Я. А. Стойкова // Вісник КрНУ. — 2012. — № 32. — С. 44–47.
- Безверхий, И. В. Разработка мероприятий для увеличения сегрегации агломерационной шихты при ее загрузке на аглоленту [Текст]: тезисы докладов / И. В. Безверхий, А. А. Томаш // Международная научно-техническая конференция «Университетская наука 2010». — Мариуполь, 2010. — Том 1. — С. 40–42.
- Петрушов, С. Н. Формирование структуры агломерационного слоя шихты [Текст] / С. Н. Петрушов, А. М. Новохатский и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. — 1998. — № 8. — С. 21–24.
- Устройство для загрузки обжиговой конвейерной машины [Текст]: Патент РФ № 2089806, МПК: F27B21/10 / Кокорин Л. К., Флягин Ю. Д.; патентообладатель АО «Уральский завод тяжелого машиностроения». — заявл. 02.03.1994; опубл. 10.09.1997. — 5 с.
- Maki, T. Study for Evaluation and Optimization of Iron Ore Granulation with Consideration of Dynamics and Particle Conditions [Text] / T. Maki, I. Sekiguchi // ISIJ International. — 2009. — Vol. 49, № 5. — P. 631–636. doi:10.2355/isijinternational.49.631
- Крижевский, А. В. Влияние гранулометрического состава спекаемой шихты на расход агломерационного топлива [Текст] / А. В. Крижевский, Г. И. Рудовский и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. — 1992. — № 1. — С. 4–6.
- Пазюк, М. Ю. Влияние условий загрузки на формирование структуры слоя шихты [Текст] / М. Ю. Пазюк // Изв. вузов. Черная металлургия. — 1985. — № 6. — С. 133–136
- Пазюк, М. Ю. Управление процессом формирования слоя агломерационной шихты [Текст] / М. Ю. Пазюк // Изв. вузов. Черная металлургия. — 1985. — № 10. — С. 131–134.
- Мных, А. С. Определение оптимального распределения твердого топлива в слое загружаемой шихты для выравнивания теплового режима агломерационного процесса [Текст] / А. С. Мных // Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. — 2014. — № 6. — С. 47–51.
- Мных, А. С. К вопросу исследования механизма формирования слоя полидисперсной агломерационной шихты [Текст] / А. С. Мных, М. Ю. Пазюк // Металургія. Наукові праці Запорізької державної інженерної академії. — 2014. — Вип. 2(32). — С. 5–9.
- Мных, А. С. Определение сегрегации фракций аглошихты, требуемой для стабилизации теплового режима спекания [Текст] / А. С. Мных, А. О. Еремин, И. Н. Мных // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2015. — № 1/8(73). — С. 68–73. doi:10.15587/1729-4061.2015.37829

## ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ШАРУ АГЛОШИХТИ ПІДГОТОВЛЕНОЇ ДО ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ

В роботі, на прикладі системи живильник — прямолінійний завантажувальний лоток, проведено дослідження динаміки процесу формування шару полідисперсного шихтового матеріалу, що завантажується на палети агломеративної машини.

Автором запропонована методика, яка дозволяє розраховувати розподіл фракційного складу шихти по висоті шару, й встановлено діапазон зміни параметрів лотка, що розглядається, для його ефективної роботи.

**Ключові слова:** сегрегація, агломерація, завантажувальний лоток, тепловий режим, горизонт шару, шихта.

*Мных Антон Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра электротехники и энергетического менеджмента, Запорожская государственная инженерная академия, Украина, e-mail: mnikh.a@yandex.ua.*

*Мних Антон Сергійович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра електротехніки та енергетичного менеджменту, Запорізька державна інженерна академія, Україна.*

*Mnyh Anton, Zaporozhye State Engineering Academy, Ukraine, e-mail: mnikh.a@yandex.ua*