

## РОЗДІЛ «ТЕПЛОТЕХНІКА. ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА»

УДК 669.162.1

МНЫХ А.С., к.т.н., доцент

Запорожская государственная инженерная академия

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕГРЕГАЦИИ ГРАНУЛ ПО ВЫСОТЕ СЛОЯ,  
ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЙ ИСКЛЮЧЕНИЕ  
НЕРАВНОМЕРНОЙ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ ОКАТЫШЕЙ

**Введение.** Промышленные окатыши получают путем их высокотемпературной обработки в обжиговых агрегатах. В настоящее время используется три типа агрегатов: шахтные печи, конвейерные машины и комбинированные установки. На сегодня агрегаты конвейерного типа являются самыми распространенными при производстве окучкованного железорудного сырья на территории Украины и стран СНГ в связи с эффективностью и экономичностью данной схемы производства.

В современных условиях среди различных показателей качества окучкованного железорудного сырья наиболее важным является механическая прочность, которая лимитирует уровень форсирования доменной плавки и сокращения расхода твердого топлива на выплавку чугуна. Механическая прочность окатышей зависит как от физико-химических показателей сырья, так и от технологических факторов его обработки в процессе окучкования. При этом существенное значение имеет интенсивность температурно-временного режима обжига.

**Постановка задачи.** Опыт эксплуатации конвейерных обжиговых машин показал, что основная масса низкокачественных обожженных окатышей образуется в нижних горизонтах слоя, что связано с неравномерностью их температурного режима обжига во времени по высоте материала. Низкое качество окатышей связано с ограниченным временем их пребывания при температуре обжига.

Известно, что время протекания физико-химических процессов при термической обработке окатышей зависит от их размера. Таким образом, актуальным становится вопрос определения требуемой сегрегации фракций окатышей по высоте слоя, а также времени и количества энергии, необходимой для нагрева окатыша заданного размера до требуемой температуры  $1250 \div 1300^\circ\text{C}$  и полного завершения процессов термоупрочнения.

В связи с тем, что в настоящее время окатыши на обжиговую машину загружаются с помощью роликового укладчика, не позволяющего обеспечить разделение классов крупности окатышей, в работе целесообразно рассмотреть изменение конструкции узла загрузки для создания требуемого распределения окатышей со средним диаметром  $d_{cp}$  по высоте слоя.

**Результаты работы.** Для производства обожженных окатышей в условиях ЦГОК масса тонкоизмельченного железорудного материала предварительно окомковывается с целью получения сырых окатышей, гранулометрический состав которых приведен в табл.1.

Таблица 1 – Гранулометрический состав сырых окатышей ЦГОК

	Фракции, мм					
	+16	16-12	12-10	10-8	-8	
Доля, %	7,6	52,5	34,1	4,7	1,1	100
$d_{cp}$ , мм	18	14	11	9	5	12,947

Распространенность в природе магнетитовых руд, а также высокие технико-экономические показатели магнетитовых способов обогащения привели к тому, что окатыши, в основном, изготавливают из магнетитовых концентратов. Химический состав окатышей, подготовленных к термической обработке, представленный в табл.2, имеет существенное влияние на тепловой режим и физико-химические реакции, протекающие в окатыше при обжиге.

Таблица 2 – Химический состав сырых окатышей

	Концентрат	Бентонит	Флюс
Доля, %	97,18	0,82	2
Feобщ	69,5	3,17	3,75
FeO	28,25	0,63	0,2
SiO <sub>2</sub>	2,58	54,91	11,37
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,1	15,08	25,31
CaO	0,09	6,99	25,68
MgO	0,18	1,72	0,56
MnO	0,02	1,16	0,37

Технологический процесс обжига окатышей протекает с непрерывным выделением и поглощением значительного количества тепловой энергии. Для ее численного определения разобьем слой материала, обжигаемого на паллете конвейерной машины, на единичные объемы и рассмотрим процессы, составляющие тепловой баланс в объеме  $P$  (рис.1).

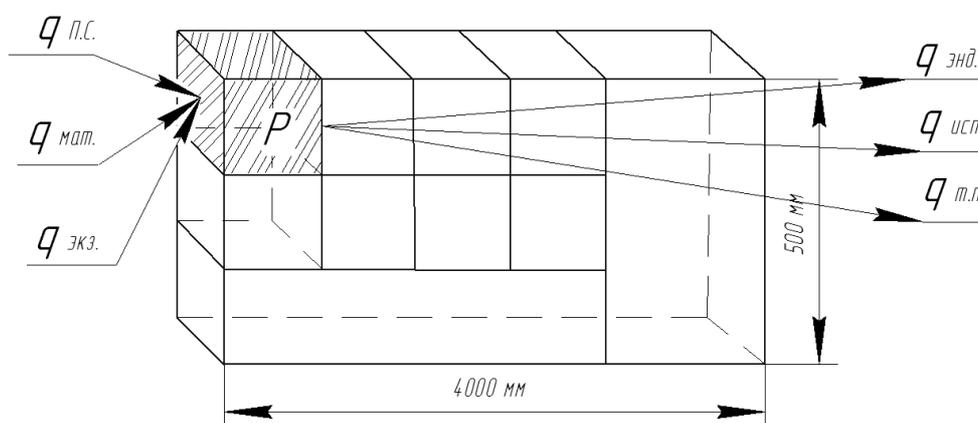


Рисунок 1 – Единичный расчетный объем слоя обжигаемых окатышей

Основным источником тепловой энергии, поступающей в единичный объем, является теплота продуктов сгорания топлива, просасываемых через слой. Для количественного определения объемов теплоты, выделяемой по пяти зонам обжиговой машины, воспользуемся формулой:

$$q_{п.с.} = S_{п.с.} \omega_{п.с.} t c_{п.с.} T_{п.с.} \rho_{п.с.}, \quad (1)$$

где  $S_{п.с.}$  – площадь единичной поверхности элемента, м<sup>2</sup>;  $\omega_{п.с.}$  – скорость движения продуктов сгорания, м/с;  $t$  – время термообработки в каждой зоне I-V, с;  $c_{п.с.}$  – теплоемкость продуктов сгорания, кДж/(кг·°С);  $\rho_{п.с.}$  – плотность продуктов сгорания, кг/м<sup>3</sup>;  $T_{п.с.}$  – температура продуктов сгорания, °С;  $T_{п.с.} = (T_M - 100)$  – температура газов определяется по результатам моделирования процесса на тепловой модели обжига окатышей [1].

Тепло, вносимое сырыми окатышами, можно определить следующим образом:

$$q_{мат} = V \rho_M c_M T_M (1 - \varepsilon) \vartheta, \quad (2)$$

где  $V$  – объем расчетного элемента, м<sup>3</sup>;  $c_M$  – теплоемкость сырых окатышей, кДж/(кг·°С);

$T_M$  – температура окатышей, °С;  $\rho_M$  – плотность окатышей, кг/м<sup>3</sup>;  $\varepsilon$  – порозность слоя;  $\mathcal{G}$  – коэффициент аккумуляции тепловой энергии (0,01÷0,5).

Основной химической реакцией в период прогрева окатышей из магнетитовых руд является окисление магнетита до гематита. Превращение магнетита в гематит сопровождается значительным выделением теплоты [2]:

$$q_{\text{экз}} = a_M \cdot \Delta H_M, \quad (3)$$

где  $a_M$  – содержание магнетита в материале, кг;  $\Delta H_M$  – теплота превращения магнетита в гематит, кДж/кг.

Окисление магнетита проходит по реакции:



К расходным статьям, связанным с поглощением тепла в элементарном объеме шихты, отнесем эндотермические реакции, протекающие в зоне подогрева в результате разложения карбонатов, содержащихся в шихте при производстве офлюсованных окатышей:

$$q_{\text{энд}} = a_u \cdot \Delta H_u + a_d \cdot \Delta H_d, \quad (4)$$

где  $a_u$ ,  $a_d$  – доля известняка и доломита в шихте, кг;  $\Delta H_u$ ,  $\Delta H_d$  – теплота на химическую реакцию, кДж/кг.

Разложение карбонатов происходит по реакциям:



Тепло на испарение влаги, содержащейся в единичном объеме слоя, рассчитаем следующим образом:

$$q_g = a_g \cdot \Delta H_g, \quad (5)$$

где  $a_g$  – содержание влаги в материале, кг;  $\Delta H_g = 179,5$  кДж/кг – теплота испарения влаги.

Для единичных объемов, соприкасающихся со стенками паллет обжиговой машины, тепловые потери теплопроводностью  $q_{T.П.}$  составляют:

$$q_{T.П.} = \alpha_F \cdot S_{П.} (T_{П.} - T_g), \quad (6)$$

где  $T_{П.}$  – температура поверхности паллеты, °С;  $T_g$  – температура воздуха, °С;  $\alpha_F$  – коэффициент теплопередачи через стенку, Вт/(м<sup>2</sup>°С).

Результаты расчетов количества теплоты, вносимой в единичный объем  $P$  продуктами сгорания в каждую зону обжиговой машины в зависимости от расположения расчетного элемента по высоте паллеты, а также суммарная энергия, выделяемая в элементе  $P$  по горизонтам, представлена на рис.2.

Из кривой  $Q_{\text{сум}}$  видно, что распределение тепловой энергии, выделяемой в единичном объеме по горизонтам слоя, является неравномерным в связи с аккумуляцией теплоты в верхних слоях обжигаемого материала.

Для решения задачи по установлению времени и количества теплоты, необходимых для обжига окатыша заданного размера и единичного объема в рассматриваемом

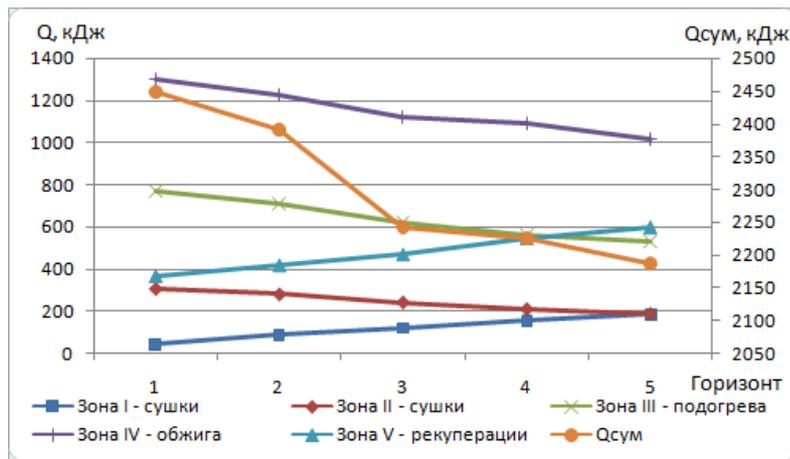


Рисунок 2 – Количество теплоты, поступающей в слой каждой зоны обжиговой машины, и суммарная энергия, выделяющаяся в единичном объеме  $P$

$$Q_i = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho \varepsilon_0 (Q_{сум} / m), \quad (7)$$

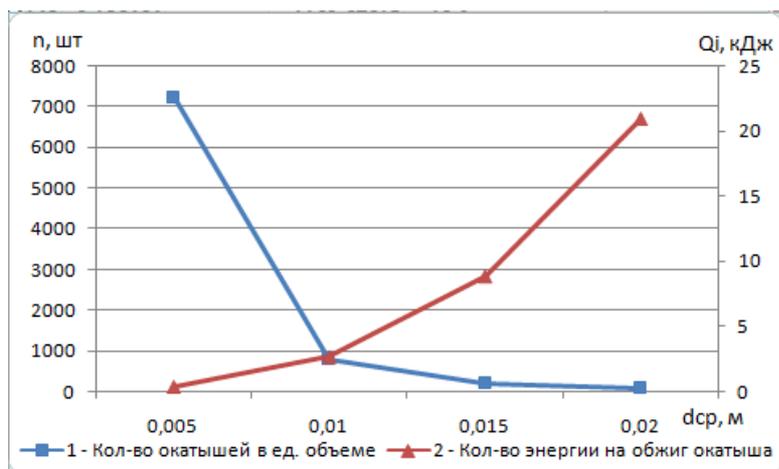


Рисунок 3 – Изменение количества окатышей и необходимого количества энергии для их термообработки в зависимости от  $d_{cp}$

нам, количество теплоты, выделяемое в единичном объеме слоя окатышей, кДж.

Из кривой 1, рис.4 видно, что размер окатыша значительно влияет на время его обжига. Так, время термической обработки окатыша с  $d_{cp}=0,01$  м практически в 10 раз меньше необходимого времени обработки окатыша с  $d_{cp}=0,02$  м.

Суммарную энергию, необходимую для нагрева до температуры  $1250 \div 1300^\circ\text{C}$  и завершения процессов термоупрочнения в единичном объеме, состоящем из окатышей заданного размера, определим из формулы:

$$Q_{сум\_v} = Q_i n \frac{F}{V}. \quad (9)$$

горизонте слоя, определено количество окатышей, которое возможно расположить в данном объеме. При принятой плотной ромбоэдрической укладке окатышей с размером единичной ячейки  $0,1 \times 0,1 \times 0,1$  м и диапазоном изменения  $d_{cp}$  окатыша  $5 \div 20$  мм количество шарообразных частиц  $n$  изменяется в соответствии с кривой 1, рис.3.

Количество энергии, необходимое для обжига окатышей заданного размера, определим из формулы

где  $r$  – радиус окатыша, м;  $\varepsilon_0$  – пористость окатыша (0,21-0,36);  $m$  – масса единичного объема, кг [3].

Из кривой 2, рис.3 видно, что с увеличением размера окатыша количество необходимой энергии для обжига существенно увеличивается. Необходимое время обработки окатыша определим следующим образом:

$$t_i = \frac{Q_i t_o}{Q_{сум}}, \quad (8)$$

где  $t_o$  – время обжига, с;  $Q_{сум}$  – суммарное, по зо-

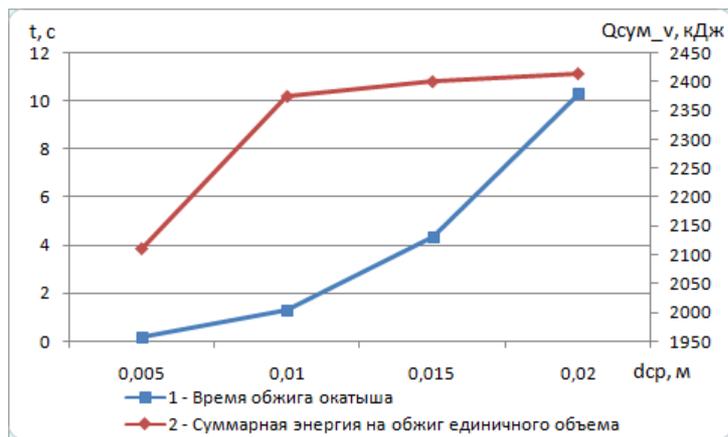


Рисунок 4 – Зависимость требуемого времени и энергии для обжига окатышей от  $d_{cp}$

сов крупности окатышей и их дифференцированную укладку по высоте слоя. Последнее призвано исключить недостаточный обжиг крупных гранул, попадающих в нижние горизонты слоя, за счет неравномерности их температурно-временной обработки.

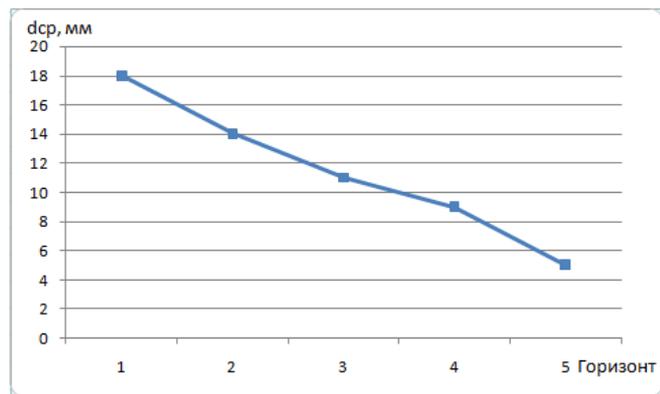


Рисунок 5 – Требуемое распределение крупности окатышей по горизонтам слоя

возможность настройки расстояния между валками таким образом, чтобы наиболее крупные частицы сырых окатышей концентрировались преимущественно в верхних *горизонтах* слоя, тем самым увеличивая время пребывания последних в зонах высоких температур, а мелкие окатыши укладывались в нижние горизонты. Таким образом возможно обеспечить требуемую сегрегацию сырых окатышей, что поспособствует увеличению прочности обожженных гранул и снижению затрат на тягодутьевые средства обжиговой машины за счет повышения порозности слоя и уменьшения его газодинамического сопротивления.

**Выводы.** В работе проведены исследования, направленные на изучение тепловых процессов и объемов тепловой энергии, выделяемой и поглощаемой в единичном объеме слоя обжигаемых окатышей. Установлено количество энергии и необходимое время обжига гранулы заданного размера. Определено суммарное количество тепловой энергии для термической обработки единичного объема окатышей с заданным  $d_{cp}$ .

Известно, что с уменьшением размера окатышей увеличивается их объемная поверхность  $F/V$ , что способствует интенсификации теплообмена [4]. В результате видно (рис.4), что суммарное количество энергии, необходимое на обжиг единичного объема состоящего из мелких окатышей, существенно ниже, чем требуется для обжига окатышей большего диаметра.

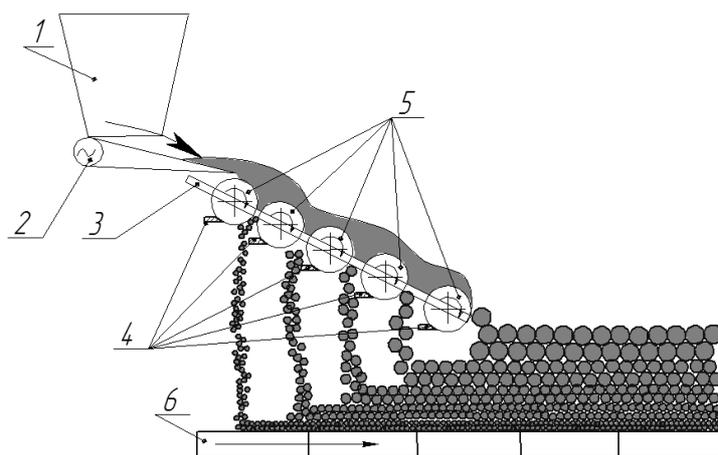
Таким образом, с целью обеспечения равномерного обжига окатышей различного размера необходимо обеспечить разделение клас-

Из анализа значений  $Q_{сум}$  и

$Q_{сум\_v}$  получено требуемое распределение  $d_{cp}$  окатышей по горизонтам слоя, представленное на рис.5.

В результате анализа существующих загрузочных систем для укладки сырых окатышей наиболее близким решением для обеспечения требуемой дифференцированной укладки материала будет применение традиционной загрузочной системы с заменой роликового укладчика на валковый грохот [5], рис.6.

Достоинством грохота приведенной конструкции является



- 1 – бункер, 2 – вибрационный питатель,  
3 – валковый грохот, 4 – валки,  
5 – очистные ножи, 6 – паллеты

Рисунок 6 – Загрузочная система с применением валкового грохота

Проведенные исследования позволили установить необходимость дифференцированной укладки окатышей по высоте слоя для исключения неравномерности их тепловой обработки. Предложена конструкция валкового грохота, призванная обеспечить требуемую сегрегацию гранул по горизонтам.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мных, А.С. К вопросу синтеза тепловой модели термообработки железорудных окатышей [Текст] / А.С.Мных // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2015. – №7. – С.14-20.
2. Лисиенко В.Г. Теплофизика металлургических процессов: учебник для вузов [Текст] / В.Г.Лисиенко, В.И.Лобанов, Б.И.Китаев. – М.: Металлургия, 1982. – 240с.
3. Плотников С.В. Исследование механизма фазообразования при окислительном обжиге и металлизации окатышей из руд железистых кварцитов [Текст]: автореф. дисс. на соискание науч. степени канд. техн. наук: 05.16.02 „Металлургия черных, цветных и редких металлов” / С.В.Плотников. – Москва, 2013. – 28с.
4. Исаченко В.П. Теплопередача: учебник для вузов [Текст] / В.П.Исаченко, В.А.Осипова, А.С.Мукомел. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Энергия, 1975. – 488с.
5. Пат. № 2089806 Российская Федерация, МПК F27B21/10. Устройство для загрузки обжиговой конвейерной машины / Л.К.Кокорин, Ю.Д.Флягин; заявитель и патентообладатель АО «Уральский завод тяжелого машиностроения». – № 94003993/02; заявл. 02.03.1994; опубл. 10.09.1997. – 4 с.

Поступила в редколлегию 26.05.2015.

УДК 621.1.018

КАШИНСКИЙ И.С., студент  
ЧУХНО С.И., к.т.н., доцент

Днепродзержинский государственный технический университет

### РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ НАГРЕВА КАПЛИ НА ПЕРЕГРЕТОЙ ПОВЕРХНОСТИ

**Введение.** Применение распыленной мелкодисперсной охлаждающей жидкости является одним из эффективных способов охлаждения при обработке резанием. Интенсифицирование теплоотвода при этом обеспечивается кипением и испарением капель жидкости на охлаждаемой поверхности. Несмотря на то, что этот способ охлаждения давно известен, он не получил достаточно широкого распространения. Вероятно, это связано с тем, что теоретические исследования, посвященные процессу кипения жидкости на перегретой поверхности, не имели прямого экспериментального подтверждения.

Метод капельного испарения жидкости применяется также в других отраслях,