

*д.т.н. Петрушов С.Н.,  
к.т.н. Русанов И.Ф.,  
Лупанов Д.В.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

## **ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА ПРОЦЕССА СПЕКАНИЯ ОДНОРОДНОЙ ПО КРУПНОСТИ ШИХТЫ**

*Наведено результати теоретичних і практичних досліджень, що характеризують розподіл тепла по висоті шару, що спікається, однорідної за крупністю шихти.*

***Ключові слова:** агломерація, паливо, тепловий баланс, однорідна за крупністю шихта.*

*Приведены результаты теоретических и практических исследований, характеризующие распределение тепла по высоте спекаемого слоя однородной по крупности шихты.*

***Ключевые слова:** агломерация, топливо, тепловой баланс, однородная по крупности шихта.*

**Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими заданиями.** Одним из основных направлений развития современной технологии агломерационного процесса стало увеличение доли мелкодисперсного концентрата до 80% и более. При этом значительно ухудшились газодинамические условия спекания агломерата, что препятствует повышению высоты спекаемого слоя. Газодинамические условия спекания агломерата могут быть улучшены при переходе на спекание однородной по крупности шихты. Получение такой шихты возможно, например, при ее окомковании в рециркуляционном режиме в окомкователе, разработанном в ДонГТУ [1].

Как известно, при агломерации неоднородной по крупности шихты в верхнем ее слое на агломашине содержание топлива больше, чем в шихте нижележащих слоев. Однако количества тепла, выделяемого этим топливом, недостаточно для спекания шихты в верхнем слое, и эта недостача компенсируется введением дополнительного тепла в этот слой за счет внешнего подогрева шихты.

При спекании однородной шихты топливо распределено равномерно по всей высоте ее слоя, и в верхнем слое спекаемой шихты не-

достаток тепла для протекания процесса спекания и получения качественного агломерата еще более значителен.

В связи со сказанным возникает проблема разработки новых технологий дополнительного ввода тепла в верхний слой спекаемой шихты на основе анализа потребностей в дополнительном тепле верхнего слоя однородной по крупности шихты.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Теоретические основы внешнего нагрева агломерационной шихты изложены в работе Сигова А.А. и Шурхала В.А [2]. В последующих работах разных авторов вопрос внешнего нагрева шихты получил дальнейшее развитие. Однако все сделанные в этих работах оценки, выводы и рекомендации относятся к спеканию неоднородных по крупности шихт.

В связи с этим, при переходе на спекание однородной по крупности шихты возникает необходимость детального рассмотрения условий внешнего нагрева спекаемой шихты.

**Постановка задачи.** В работе поставлена задача: на основе зональных тепловых балансов с учетом регенерации тепла отходящими газами оценить тепловой уровень спекаемого слоя однородной по крупности шихты в целом и поверхностного слоя в частности.

**Представление основного материала исследования.** Одной из главных теплотехнических задач агломерационного процесса является обеспечение постоянства максимальной температуры в зоне горения по всей высоте спекаемого слоя. При этом будет достигнуто постоянство свойств агломерата во всем объеме пирога.

Решение этой главной задачи сводится к оптимальному распределению топлива по высоте слоя, т.е. общий расход топлива  $g_T$  необходимо распределить по элементарным слоям согласно закону, обеспечивающему постоянство максимальной температуры по всей высоте пирога.

Требуемое распределение топлива по высоте слоя шихты устанавливается методом зональных тепловых балансов. При этом весь спекаемый слой шихты разбивается по высоте на  $n$  элементарных слоев. Толщина одного элементарного слоя принимается равной толщине зоны горения  $h$ , колеблющейся в пределах 15-35 мм. Для средних условий спекания можно принять  $h = 20$  мм.

Зональный баланс предусматривает составление для каждого элементарного слоя системы трех уравнений с последующим их решением и нахождением неизвестных расходов железорудной части, флюса и топлива.

При наличии большого числа элементарных слоев – от 15 до 20 и более такой путь приводит к необходимости составления и решения 15-20 систем уравнений, что крайне затруднительно. Для упрощения решения задачи обычно принимается, что расходы этих материалов не изме-



$Q_s$  – тепло, выделяемое при выгорании серы;  
 $Q_{\Delta O_2}$  – тепло, выделяющее в результате окислительных процессов;  
 $Q_{мин}$  – теплота минералообразования;  
 $Q_{ш}$  – теплосодержание шихты;  
 $Q'_{подс}$  – теплосодержание подсасываемого воздуха;  
 $Q_{в рег}$  – теплота регенерации верхней ступени теплообмена;  
 $Q_a$  – теплосодержание пирога готового агломерата;  
 $Q_{карб}, Q_{гидр}$  – затраты тепла на диссоциацию карбонатов и гидратов соответственно;

$Q_{o.г}$  тепло уносимое отходящими газами;  
 $Q''_{подс}$  – тепло, теряемое с подсасываемым воздухом;  
 $Q_{пар}$  – теплота парообразования;  
 $Q_{исп}$  – теплота испарения влаги;  
 $Q_{пот}$  – тепло, теряемое в окружающую среду;  
 $Q_{ш рег}$  – теплота регенерации нижней ступени теплообмена.

При переходе к зональному тепловому балансу структура теплового баланса не изменяется, изменяется лишь количество тепла  $q_i$  по его статьям.

Большинство составляющих приходной и расходной частей уравнения теплового баланса при переходе от одного элементарного слоя к другому сохраняются постоянными, и их можно выразить через величины слагаемых уравнения (1), характеризующих весь слой в целом, путем деления соответствующих значений на количество элементарных слоев.

Тогда уравнение теплового баланса для элементарного слоя примет вид

$$\sum q_i^{np} + q_{заж} + q_c + q_{в рег n} + q_{ш рег n} = \sum q_i^{pac} + q_{в рег p} + q_{ш рег p} - q_{пот} + q'_{исп} + q'_{пар}, \quad (2)$$

где  $\sum q_i^{np}$  и  $\sum q_i^{pac}$  – суммарное количество тепла, которое не изменяется от слоя к слою в приходной и расходной части баланса соответственно;

$n$  и  $p$  при величинах  $q_{в рег}$  и  $q_{ш рег}$  – показывают их принадлежность соответственно к приходной и расходной части баланса.

В условиях ПАО “Алчевский металлургический комбинат” при спекании шихты, в железорудной части которой содержание концентрата составляет около 80 %, общий приход тепла согласно проведенному расчету составляет 1 880 МДж. При делении всего спекаемого слоя на 15 зон (общая высота слоя равна 300-330 мм), на каждый слой прихо-

дится  $q_{\Sigma} = 235,7$  МДж тепла. Из этого количества тепла его приход в слой по статьям, по которым приход тепла от слоя к слою не изменяется,  $\Sigma q_i^{np}$  равен 15,7 МДж.

Входящая в расходную часть теплового баланса  $\Sigma q_i^{pac}$  согласно проведенному расчету для тех же условий для элементарного слоя равна 182,4 МДж.

Теплота зажигания, сообщаемая слою в начальный период спекания, по данным [2] используется на 75-80 % первым элементарным слоем и меньшая его часть 20-25 % приходится на второй элементарный слой. Принимаем, что на первый слой расходуется 80 %, а на второй – 20 % теплоты зажигания.

Таким образом, при общей теплоте зажигания равной 110 МДж, первый слой получит дополнительного тепла 82,5 МДж, а второй – 27,5 МДж.

Как следует из уравнения (2), количество тепла, которое усваивается каждым элементарным слоем, определяется содержанием в слое топлива ( $q_c = Q_m \cdot g_m$ ,  $Q_m$  – теплотворная способность топлива,  $g_m$  – содержание топлива в слое) и количеством регенерированного тепла.

При определении прихода теплоты за счет его регенерации шихтой для упрощения примем, что для всех элементарных слоев оно одинаково. Такое допущение не вносит заметной погрешности в вычисления. Эта теплота распределяется равномерно по всем элементарным слоям, кроме первого, где этот вид регенерации отсутствует. Для всего слоя теплота регенерации шихты, по данным [3] около 784,6 МДж. Тогда элементарный слой за счет регенерации шихтой тепла получит  $q_{ш\text{ рег } n} = 56,0$  МДж.

Количество теплоты, которая регенерирована воздухом. для каждого элементарного слоя может быть рассчитано по методике, изложенной в [3] по точной формуле

$$q_{в\text{ рег } n} = Q_{в\text{ рег } X_n} - Q_{в\text{ рег } X_{n-1}}, \quad (3)$$

где  $Q_{в\text{ рег } X_n}$  и  $Q_{в\text{ рег } X_{n-1}}$  – общее количество регенерированной воздухом теплоты при перемещении зоны горения на расстояние соответственно  $X_n$  и  $X_{n-1}$  от поверхности спека.

Разница  $X_n$  и  $X_{n-1}$  принимается равной толщине одного элементарного слоя, т.е. зоны горения равной 20 мм.

Регенерированная воздухом теплота в зоне охлаждения спека на участке  $0...X$  вычисляется по формуле

$$q_{в\text{пез}n} = FC_a \gamma_a [t'_a(1 - \bar{\beta}) - t'_e] A \left( X + \frac{e^{-bk'X} - 1}{bk'} \right), \quad (4)$$

где  $F$  – поверхность всасывания, необходимая для получения 1 т готового агломерата, м<sup>2</sup>;

$C_a$  – удельная теплоемкость агломерата, кДж/(кг·град);

$\gamma_a$  насыпная масса агломерата, кг / м<sup>3</sup>,  $A$ ,  $b$  и  $k'$  – коэффициенты;

$t'_a$  и  $t'_e$  – температура аглоспека и воздуха в зоне охлаждения спека, °С;

$\bar{\beta}$  – среднее значение тепловых потерь в зоне охлаждения спека на участке  $0...X$ .

Обычно величина тепловых потерь в слое находится в пределах от 4 до 8 %. При рассмотрении зональных балансов учитывается, что поверхностные слои теряют теплоту больше, чем внутренние горизонты.

Тепловые потери в зоне охлаждения спека по отдельным элементарным слоям толщиной 20 мм приняты следующими, %: горизонт 1 – 12,5; горизонт 2 – 7,5; горизонт 3-14 – 6,03; горизонт 15 – 0.

Среднее значение тепловых потерь  $\bar{\beta}$  в зоне охлаждения спека на участке  $0...X$  от первого по  $i$  слой определяется как среднее арифметическое значений  $\beta_i$

$$\bar{\beta} = \frac{\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \dots + \beta_i}{i}.$$

Значения всех остальных величин входящих в формулу (4), рассчитанные по методике [3] следующие:  $A = 0,74332$ ;  $k' = 0,3$ ;  $b = 95,68 \text{ м}^{-1}$ ;  $F = 2,049 \text{ м}^2$ ;  $C_a = 1,006 \text{ кДж/(кг·град)}$ ;  $\gamma_a = 1675 \text{ кг / м}^3$ ;  $t'_a = 1250 \text{ °С}$ ;  $t'_e = 20 \text{ °С}$ .

Абсолютное значение тепловых потерь зоной охлаждения в целом и в каждом элементарном слое охлаждения определяется соответственно по формулам (5) и (6)

$$Q_{nom} = G_{ui} \cdot C_a \cdot t_a \frac{x-z}{x} \bar{\beta}, \quad (5)$$

$$q_{i\text{ nom}} = \frac{Q_{nom}}{N-1} \cdot \frac{\beta_i}{\bar{\beta}}, \quad (6)$$

где  $x$  – протяженность зоны охлаждения;

$z$  – толщина зоны горения,  $N$  количество элементарных слоев.

При формировании тепловой волны в первом элементарном слое за счет отходящих из этого слоя газов не только подогревается сухая шихта второго слоя, но и испаряется из него гигроскопическая влага с затратой теплоты  $q'_{исп}$  с теплосодержанием  $q'_{нар}$ . Поэтому расход теплоты для первого слоя должен быть увеличен на  $q'_{исп}$  и  $q'_{нар}$ .

После всех преобразований из уравнения теплового баланса (2) необходимое количество топлива в каждом элементарном слое для условий ПАО “Алчевский металлургический комбинат” может быть рассчитано по формуле

$$g_{m i} = \frac{1}{Q_m} (177000 - q_{заж i} - q_{в пег n i} - q_{ш пег n i} - q_{i ном} + q'_{нар} + q'_{исп}). \quad (7)$$

Зная количество топлива в элементарном слое можно рассчитать содержание углерода в нем по формуле

$$C_i = \frac{g_{с шихт i} + 0,01C_m g_{m i}}{g_{шихт i} + g_{m i}} 100 \% , \quad (8)$$

где  $g_{шихт i}$  и  $g_{с шихт i}$  – масса шихты без топлива и углерода в слое соответственно кг;

$C_m$  – содержание углерода в топливе, %.

Результаты расчета теоретически необходимого содержания углерода в элементарных слоях по высоте слоя, выполненного в соответствии с изложенным выше приведены на графике рисунка 2.

На практике распределение углерода по высоте слоя при спекании шихты, окомкованной в барабане-окомкователе отличается от теоретического (рисунок 2), но в целом приближается к нему. Такое распределение углерода топлива по высоте слоя является, во-первых, проявлением закономерностей распределения топлива по гранулам (в мелких гранулах его больше), и, во-вторых, технологией загрузки шихты на агломашину. Загрузочные устройства шихты современных агломашин позволяют регулировать распределение топлива по высоте слоя путем изменения степени развития сегрегации гранул по высоте слоя, что и позволяет приблизить реальное распределение углерода по высоте слоя к теоретически необходимому.

При загрузке однородной по крупности шихты, полученной в результате окомкования ее в рециркуляционном режиме, углерод топлива распределен равномерно по высоте слоя (рисунок 2). Изменить такое распределение, меняя технологию загрузки практически невозможно, так как однородные материалы сегрегируют по крупности слабо [4].

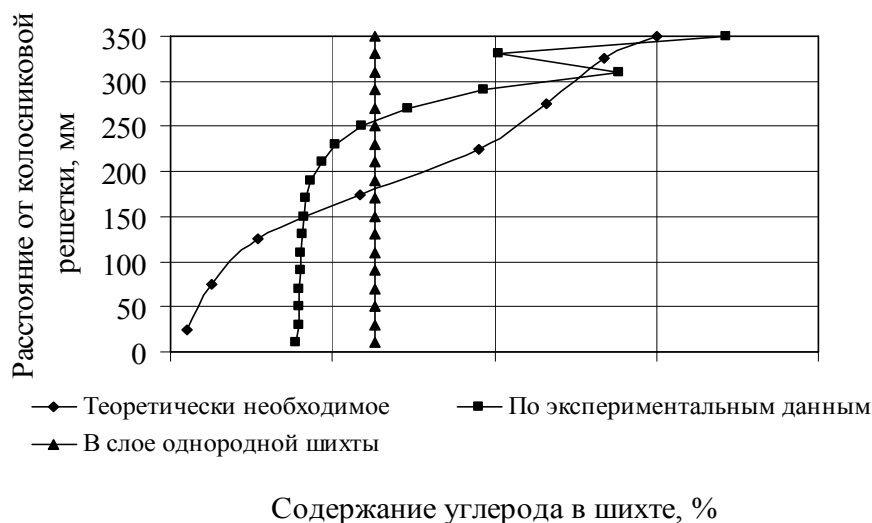


Рисунок 2 – Распределение углерода топлива по высоте спекаемого слоя аглошихты начиная от колосниковой решетки

Как видно из рисунка 2 содержание углерода в поверхностном слое однородной шихты на 0,8-1,1 % абс меньше, чем в слое неоднородной шихты. Для восполнения недостачи такого количества углерода в верхнем слое, в него необходимо каким-либо способом подать дополнительное топливо или продукты его горения. В пересчете на топливо его нехватка в верхнем слое составляет 1,0 – 1,3 кг. Теплота сгорания такого количества агломерационного топлива в условиях аглопроцесса равняется 28,7-37,3 МДж.

Такое количество теплоты слой может получить в результате его дополнительного нагрева. По применяемой в настоящее время технологии верхний слой дополнительно подогревается продуктами горения газообразного топлива сжигаемого в газогорелочном устройстве. Повысить температуру в газогорелочном устройстве с целью подачи дополнительного тепла в верхний слой при спекании однородной шихты не представляется возможным. Причиной этого является то, что, во-первых, повышение температуры связано с увеличением расхода топлива, а, следовательно, и продуктов его горения. Увеличение объема продуктов горения неизбежно приведет к ухудшению газодинамических условий спекания агломерата в начальный период процесс. Во-вторых, увеличение температуры в газогорелочном устройстве приведет к оплавлению шихты верхнего слоя, что также приведет к ухудшению газодинамических условий и, как следствие, к снижению производительности.

Проблема может быть решена в условиях, когда шихта зажигается с применением пылеугольного топлива по технологии, в соответствии с [5]. Для этого необходимо сжигание пылеугольного топлива организо-



вать таким образом, чтобы оно не полностью сгорало в факеле, и догорало на поверхностном слое шихты после ее выхода из горна. Количество такого пылеугольного топлива должно равняться 1,0 – 1,3 кг/т агломерата.

Дополнительное тепло в поверхностный слой спекаемой шихты может быть внесено за счет процессов, протекающих с выделением тепла, например, при окислении чугунной стружки по технологии, в соответствии с [6].

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Выполненный анализ показал, что при спекании однородной по крупности шихты в верхний слой необходимо вводить дополнительное количество тепла.

Наиболее рационально вводить тепло путем неполного сжигания в горне пылеугольного топлива, или вводом в слой металлосодержащих отходов, например, чугунной стружки.

#### **Библиографический список**

*Пат. 53966 України, МПК С22В 1/00. Огрудкувач шихти / Є.В. Дорогий, Г.М. Попов, В.М. Дорофєєв, В.А. Козачишин. – № 201004245; заявл. 12.04.2010; опубл. 25.10.2010, Бюл. № 20, 2010.*

*Сигов А.А. Агломерационный процесс /А.А. Сигов, В.А Шурхал. – К.: «Техніка», 1969. – 232 с.*

*Петрушов С.Н. Расчеты шихт в практике спекания агломерата / С.Н. Петрушов, А.К. Клочко. – К.: УМК ВО, 1990. – 100 с.*

*Русаков П.Г. Исследование закономерностей распределения неоднородного сыпучего материала по откосу / П.Г. Русаков, И.Ф. Русанов, В.Г. Морозов // Известия ВУЗов Черная металлургия. – 1985. – № 6.– С. 15-19.*

*Пат. 64722 України, МПК С22В 1/16. Спосіб запалення агломераційної шихти / С.М. Петрушов, І.Ф. Русанов, Є.С. Масляков, Є.А. Ружанський, М.В. Парадовський. – № 201107379; заявл. 14.06.2011; опубл. 10.12.2011, Бюл. № 21, 2011.*

*Пат. 28309 Україна, МПК С22В 1/16. Спосіб агломерації залізорудних матеріалів/ С.М. Петрушов, І.Ф. Русанов, Д.В. Лупанов, І.В. Плівко, Є.С. Масляков. № 200705557; заявл. 21.05.2007; опубл. 10.12.2007. Бюл. № 20, 2007.*

**Рекомендована к печати д.т.н., проф. Новохатским А.М**