

## Повышение энергоэффективности обжиговых конвейерных машин путем минимизации сбросов на дымовую трубу

Боковиков Б.А., Брагин В.В. Солодухин А.А. Ярошенко Ю.Г.

Мобилизацией стран на решение проблем снижения техногенного давления на окружающую среду и улучшения энергоэффективности современных промышленных технологий в последние годы прошлого века и особенно уже в настоящее время занимаются международные организации. Примером их деятельности могут служить документы «Рамочная конвенция ООН об изменении климата», «Киотский протокол» (1997 г.) и «Парижское соглашение» (2015 г.) Последнее поддержали делегации 195 стран со всего мира. В начале переговоров в Париже Президент РФ В.В. Путин заверил участников, что Россия в любом случае «уменьшит выбросы до показателя 70% от базового уровня 1990 года». Причем главным направлением деятельности промышленных предприятий в работе по уменьшению выбросов парниковых газов признано энергосбережение.

Роль металлургической отрасли в решении экологических проблем страны исключительно велика, особенно, если иметь в виду, что предприятия отрасли расходуют [1] 9,3% топлива и 5,3% электроэнергии от общего потребления в России и 5,8% природного газа от общего потребления его в экономике России.

Среди металлургических технологий значительная доля выбросов парниковых газов приходится на технологии подготовки железорудного сырья. По данным [1] в России в 2012 году было произведено 39,5 млн. т окатышей. Если принять в среднем, что при получении 1 т окатышей выбросы в атмосферу составляют 2500 м<sup>3</sup>, то годовой объем выбросов составит 98,75 млрд. м<sup>3</sup> или 132,325 млн. т.

от общего потребления. Столь значительное воздействие на состояние окружающей среды ставят перед металлургами задачу по совершенствованию технологий обжига окатышей.

После обработки информации\* о работе обжиговых конвейерных машин (ОКМ) [2] и ее обобщения в табл.1 представлены показатели работы ОКМ, которые были подвергнуты реконструкции в различной степени и в различные годы. Анализ этой информации показал, что для современной технологии термообработки железорудных окатышей на ОКМ существует прямая связь между величиной сбросов газов на дымовую трубу и удельным расходом топлива. При чем не только качественная связь, но и достаточно четкая количественная зависимость.

Эта связь проявилась через соотношение между изменением расхода топлива и объемным расходом сбросов газов на трубу, которое составляет в расчете на 1 т обожженных окатышей от 3<sup>х</sup> до 5<sup>ти</sup> м<sup>3</sup> природного газа на 1000 м<sup>3</sup> газовых сбросов. В дальнейшем исследовании принята средняя величина, равная 4 м<sup>3</sup>/1000 м<sup>3</sup>.

\* величина удельного расхода мазута для машины ОК-520 (Костомукшский ГОК) пересчитана на природный газ по соотношению их теплотворной способности (МДж/кг и МДж/м<sup>3</sup>).

Таблица 1

Удельные сбросы газов в атмосферу и удельный расход топлива  
для различных обжиговых машин

тип обжиговой машины	ОК-108	ОК-228	ОК-306	ОК-536	ОК-480	ОК-520
Удельный объем газовых выбросов, $V_{тр}$ , м <sup>3</sup> /т	3900	3900	2500	2350	2350	2000
Удельный расход топлива, $B$ , м <sup>3</sup> /т	32	20	15	12	10	9

Сбросы газов на трубу в общем случае можно разделить на две категории: 1 – неизбежные сбросы низкотемпературных (ниже 100 °С) влажных газов из зоны сушки. Это диктуется необходимостью поддержания температуры газов на электрофильтрах перед трубой на уровне 80 – 100°С (выше температуры точки росы) во избежание конденсации водяных паров; 2 – неорганизованные сбросы, являющиеся следствием недостатков тепловой схемы машины (несбалансированности объемов газа в отдельных технологических зонах) и конструктивных недостатков (большие подсосы воздуха из атмосферы по газовым трактам, слишком длинный убирающий коллектор в зоне сушки прососом и т.п.).

Более подробно следует остановиться на первой категории сбросов, определяющей минимально возможный объем сбросов газов на трубу. Для этого рассмотрим упрощенную схему зоны сушки: первой секции сушки (продув теплоносителя) - (С-1), и второй секции сушки (просос теплоносителя) - (С-2). Общий удельный объем газов на сушку в этой зоне (двух секциях) составляет  $V_c=950$  м<sup>3</sup>/т (средние данные), что позволяет определить общий удельный объем сброса газов на трубу:

$$V_{тр} = V_c + \frac{W_1 \cdot l_1 \cdot B \cdot 0,4 \cdot 3600}{G}, \quad (1)$$

где  $W_1$  – скорость фильтрации в секции (С-1), м/с;  $l_1$  – длина секции, м;  $B$  – ширина тележек машины, м;  $G$  – производительность машины по загружаемым окатышам, т/ч; 0,4 – поправка к объему газов для повышения их температуры от 50°С до 100°С.

Применительно к обжиговой машине ОК-520 Михайловского ГОКа при  $W_1 = 1,35$  м/с,  $l_1 = 13$  м,  $B = 4$  м и  $G = 600$  т/ч величина  $V_{тр} = 1120$  м<sup>3</sup>/т. К этой величине следует добавить 50 м<sup>3</sup>/т из аспирации в загрузочной части машины.

В итоге минимальная величина сбросов в головной части машины составит 1170 м<sup>3</sup>/т (без учета аспирационных сбросов в хвостовой части машины, зависящих от ее конструкции).

Более точную величину сбросов для конкретных условий получают при расчете тепловых и материальных балансов, исходные данные для которых получают на основе математического моделирования. Из выражения (1) следует, что объем сбрасываемых газов прямо пропорционален длине секции (С-1). Следовательно, для уменьшения сбросов на трубу необходимо всегда стремиться к минимальной длине секции (С-1).

Для определения длины секции зоны сушки С-2 необходимо установить соотношение длин секций (С-1) и (С-2). Первоначально были проведены экспериментальные исследования на ОКМ Лебединского и Соколовско-Сорбайского ГОКов, в результате которых пришли к выводу, что при сушке окатышей только прососом высота слоя ограничивается в пределах 200 – 250 мм. Дальнейшие промышленные испытания определили современную схему зоны сушки, названную реверсивной. При такой схеме последовательно осуществляют продув теплоносителя снизу-вверх (секция–С-1) и затем просос сверху-вниз (секция – С-2).

Реализация этой схемы была организована таким образом, что режим прососа осуществлялся через первые 3-4 дутьевых камеры (секция С-1), а далее следовал режим прососа (реверс), для которого использовали 6-10 вакуум-камер с общим коллектором для отвода низкотемпературных влажных газов.

Научное доказательство такой (реверсивной) схемы зоны сушки окатышей и оптимизация размеров этой зоны было получено путем математического моделирования тепло- массообменных процессов нагрева и испарения влаги[2], для чего была использована математическая модель “НПВП ТОРЭКС” [12, 13].

В результате моделирования было установлено, что длина зоны сушки с продувом теплоносителя имеет оптимум, при котором общая длительность процесса сушки минимальна.

Это объясняется тем, что слишком короткая по длине секция сушки 1 (С-1) только переносит влагу из нижней области слоя вверх, что способствует переувлажнению верхней области слоя и практически не удаляет влагу из слоя в целом. При сушке прососом (С-2) процесс удаления влаги сводится в начале зоны к переносу влаги из верхней части слоя в нижние горизонты, где влажность окатышей может даже повышаться и только во второй половине этой зоны начинается собственно сушка слоя (см. рис. 2). Длительность процесса сушки определяется параметрами секции (С-2), где скорость фильтрации обычно довольно низкая (0,6 – 0,7 м/с). При этом процесс сушки заканчивается практически в средних по высоте горизонтах слоя, т.к. низ слоя высушен и нагрет в секции (С-1), а верх слоя сушится при малой скорости фильтрации теплоносителя.

Общая картина распределения влажности окатышей при начальной влажности 10,5 % на сухую массу по высоте слоя при различной длине зоны сушки продувом (С-1) представлена на рис. 1-3. На этих рисунках приведены данные для нижней половины слоя при общей его высоте 330 мм и при высоте донной постели 73 мм. Как следует из анализа этих данных, при малой длине секции-С-1, равной 5 м (рис. 1), последняя влага из слоя удаляется из нижних слоев окатышей, тогда как при длине той же секции (С-1) при ее длине 11 м сушка слоя заканчивается на высоте 90 мм от постели (рис. 2), а при длине секции (С-1) – 17 м сушка заканчивается на горизонте 120 мм от постели (рис. 3).

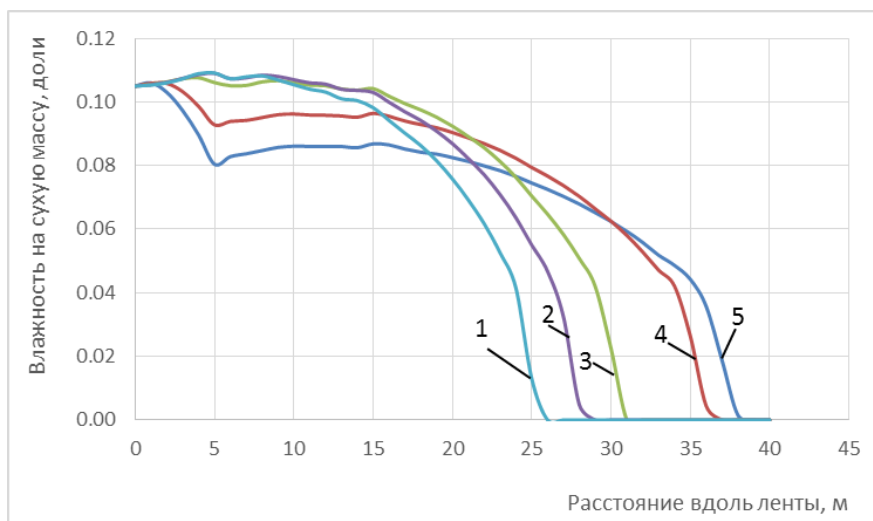


Рис. 1. Распределения влажности окатышей по высоте слоя при длине зоны сушки продувом (С-1) 5 м, на различных горизонтах (от колосников):  
 1 – 223 мм; 2 – 193 мм; 3 – 163 мм; 4 – 103 мм; 5 – 75 мм.

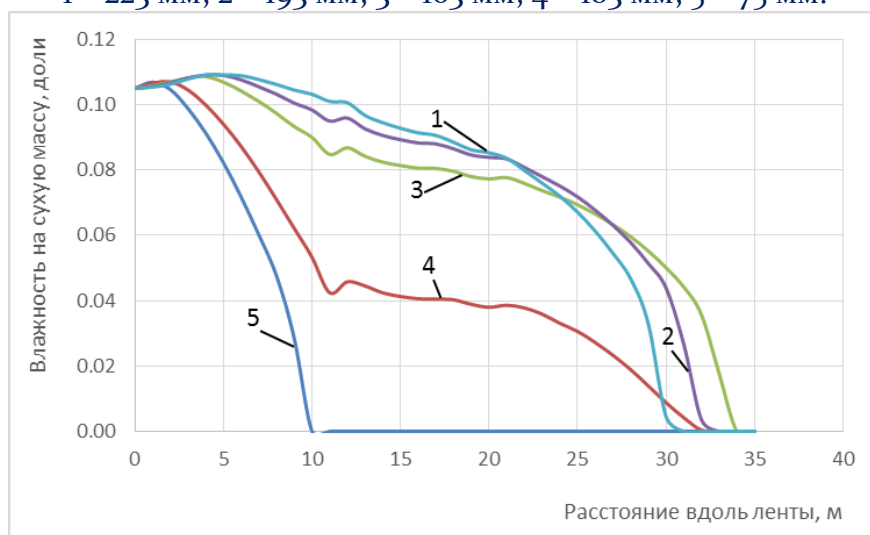


Рис. 2. Распределения влажности окатышей по высоте слоя при длине зоны сушки продувом (С-1) 11 м, на различных горизонтах (от колосников):  
 1 – 223 мм; 2 – 193 мм; 3 – 163 мм; 4 – 103 мм; 5 – 75 мм.

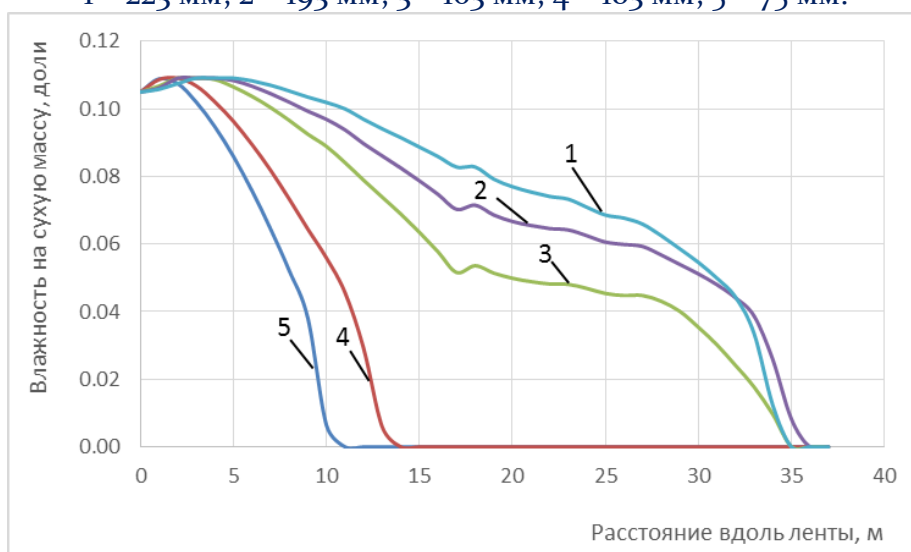


Рис. 3. Распределения влажности окатышей по высоте слоя при длине зоны сушки продувом (С-1) 17 м, на различных горизонтах (от колосников):  
1 – 223 мм; 2 – 193 мм; 3 – 163 мм; 4 – 103 мм; 5 – 75 мм.

Горизонт, на котором заканчивается сушка слоя, определяется “встречей” двух факторов сушки: снизу слоя (С-1) и сверху слоя (С-2).

Анализ закономерностей тепло- массообмена процессов испарения влаги при организации реверсивной сушки с целью определения оптимального соотношения длин секций (С-1) и (С-2), осуществили применительно к работе ОК-520 ОАО “Михайловский ГОК”. В настоящее время на этой машине длина секции (С-1) составляет 13 м. Математическое моделирование выполнили для длины секции (С-1) от 5 до 19 м с соответствующим сдвигом по длине машины секции (С-2).

Результаты моделирования всего процесса сушки представлены на рис. 4. Обращает на себя внимание то, что протяженность зоны сушки по ее длине имеет минимум в районе длины (С-1) 11 м (рис. 5 а), а переувлажнение окатышей в секции (С-2) практически заканчивается на этой отметке (рис. 5 б). Пересчет длины машины ( $l$ , м) в продолжительность процесса ( $\tau$ , мин) можно осуществить по формуле:  $\tau = l/U_{л}$ , где скорость движения ленты  $U_{л} = 4,13$  м/мин). Горизонт слоя, на котором завершается процесс сушки при удлинении секции (С-1), быстро повышается (рис. 5 в), но после 11 м (2,7 мин) процесс повышения замедляется и горизонт окончания сушки устанавливается в 130 мм от постели. На рис. 5 г приведены результаты расчета температуры окатышей на границе слой-постель в конце секции С-1 в зависимости от длины этой секции в процессе прогрева донной постели. Из анализа приведенных данных следует, что при оптимальной длине секции С-1 около 11 м нижний участок слоя прогревается до 160 °С, что достаточно для предотвращения конденсации водяных паров в нижней части слоя во второй секции зоны сушки (С-2).

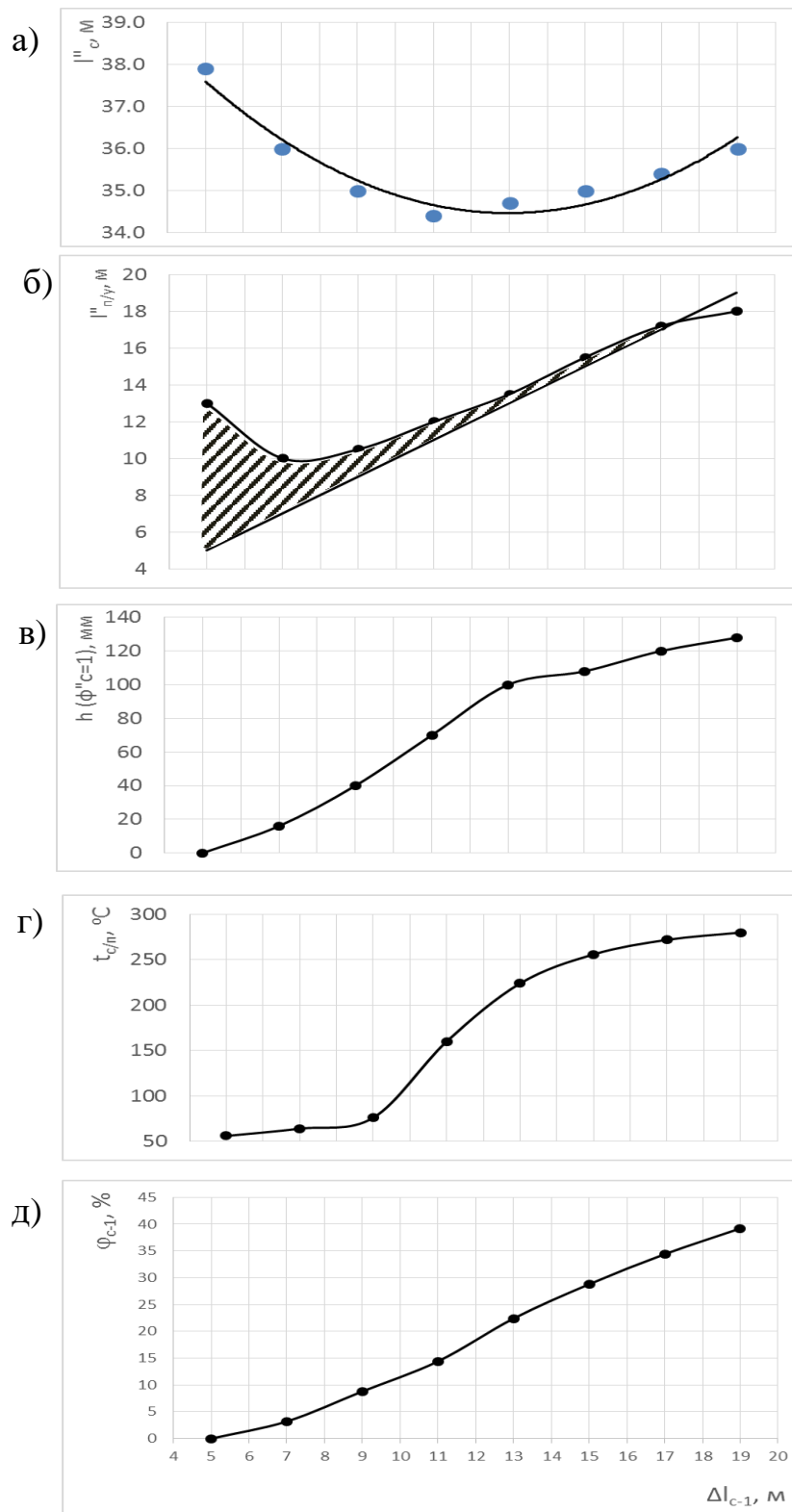


Рис. 4. Зависимость параметров зоны сушки от длины секции (С-1)  $\Delta l_{C-1}$ :

а) – протяженность участка зоны сушки ( $l''_c$ ), м;

- б) – протяженность участка зоны переувлажнения ( $I''_{п/у}$ ), м;
- в) – горизонт слоя ( $h$ ), на котором сушка всего слоя заканчивается ( $\phi''_{с=1}$ ), мм;
- г) – температура окатышей на границе слой-постель ( $t_{с/п}$ ) в конце секции (С-1), °С.
- д) – степень удаления влаги ( $\phi_c$ ) в секции С-1, %

прососом теплоносителя. На рис. 5 д приведены данные, показывающие, что оптимальной длине секции С-1 соответствует степень сушки в этой секции на уровне 15 %, т.е. роль сушки продувом теплоносителя сводится к нагреву и подсушиванию только низа слоя, а основная масса влаги удаляется из слоя в секции С-2 при прососе теплоносителя.