

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ЗАЖИГАНИЯ СЛОЯ С УЧЕТОМ СВОЙСТВ ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И ВИДА ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА

### Аннотация

Изложена методика определения основных режимных и конструктивных параметров зажигательного горна агломерационной машины на основании технологических данных о ее работе.

Агломашина, агломерат, горн, зажигание, кислород, температура, тепло, топливо, шихта.

При модернизации работающих агломашин и при проектировании новых, как правило, известными (заданными) величинами являются характеристики шихты, высота слоя, вид газообразного топлива для зажигания, температура в рабочем пространстве горна, площадь спекания агломашин (ширина тележек) и удельный расход тепла на зажигание шихты. Для разработки конструкции горна необходимо определить длительность пребывания шихты под горном,

т. е. длину горна.

Тепловой баланс процесса зажигания:

$$qH u_l \rho_{ш} k_{ш} = 60 c_2 t_2 w \ell_{горн}, \quad (1)$$

где  $q$  – удельный расход тепла на зажигание шихты, кДж/т агломерата;  $H$  – высота слоя шихты, м;  $u_l$  – скорость движения спекательных тележек, м/мин;  $\rho_{ш}$  – объемная плотность шихты, т/м<sup>3</sup>;  $k_{ш}$  – выход годного агломерата из влажной шихты, т/т;  $c_2$  – теплоемкость горновых газов, Дж/м<sup>3</sup>·К;  $t_2$  – температура горновых газов, °С;  $w$  – скорость фильтрации, м/с;  $\ell_{горн}$  – длина горна, м.

Отношение длины горна  $\ell_{горн}$  к скорости аглоленты  $u_l$  есть время пребывания шихты под горном  $\tau$ , мин:

$$\tau = \frac{qH \rho_{ш} k_{ш}}{6 \cdot 10^4 c_2 t_2 w}, \quad (2)$$

Время пребывания шихты под горном включает время нагрева исходной шихты до температуры воспламенения твердого топлива, время образования зоны горения и время дополнительного нагрева (см. рисунок).

Период дополнительного нагрева слоя близок к основному периоду спекания и харак-

теризуется одинаковой с ним скоростью фильтрации ( $w$ ).

Для определения скорости фильтрации воздуха через слой [1] используется величина удельного расхода воздуха ( $V_g$ ) на процесс спекания, в общем случае рассчитываемая как сумма расходов на горение углерода топлива шихты ( $V_C^{zop}$ ), окисление двухвалентного железа ( $V_{FeO}$ ), окисление сульфидной серы ( $V_S$ ) и горение топлива в зажигательном горне ( $V_{горн}$ ). Кроме того, в обычных условиях агломерации железорудных материалов имеется избыточный воздух ( $V_{изб}$ ), который переходит в агломерационный газ, не участвуя в перечисленных химических процессах. Таким образом, можно записать:

$$V_g = V_C^{zop} + V_{изб} + V_{FeO} + V_S + V_{горн} . \quad (3)$$



Схема расчета скоростей фильтрации и величины дросселирования вакуум-камер под горном

Расход воздуха на окисление топлива в зажигательном горне, монооксида железа и серы шихты может быть найден по стехиометрическим соотношениям их химического взаимодействия с кислородом.

Выражение для расчета расхода воздуха на горение углерода шихты с учетом химической неполноты его горения и избытка воздуха имеет вид:

$$V_C = V_C^{zop} + V_{изб} = B_C \frac{37,5 + (\beta - 0,375)O_2''}{0,375(21 - O_2'')\rho_{O_2}\beta} , \quad M^3 / M_{ш}^3 , \quad (4)$$

где  $B_C$  – объемная концентрация углерода в слое,  $кг/м^3$ ;  $O_2''$  – содержание кислорода в продуктах сгорания углерода шихты, %;  $\beta$  – стехиометрический фактор,  $кг_С/кг_{O_2}$ ;  $\rho_{O_2}$  – плотность кислорода при нормальных условиях,  $кг/м^3$ .

При статистической обработке данных промышленных исследований было установлено, что средняя величина стехиометрического фактора при агломерации различных по составу шихт равна  $0,426 \pm 0,008$ , а зависимость между содержанием кислорода в продуктах сго-

рания и концентрацией горючего углерода в слое в диапазоне ее изменения от 40 до 70 кг/м<sup>3</sup> удовлетворительно описывается уравнением, %:

$$O_2'' = 21 - \frac{1}{2,647/B_c + 0,0235}. \quad (5)$$

После соответствующей подстановки выражение для расчета расхода воздуха на горение углерода шихты (4) принимает вид:

$$V_c = 448,2 + 3,76B_c. \quad (6)$$

По величине удельного расхода воздуха рассчитывается скорость фильтрации через слой, м/с:

$$w = 0,167 \cdot 10^{-4} V_c U, \quad (7)$$

где  $U = H \frac{U_{\text{л}}}{\ell}$  — вертикальная скорость спекания, мм/мин;  $\ell$  — длина агломашины, м; и

затем коэффициент гидравлического сопротивления слоя  $A$ , необходимый для расчета в дальнейшем величины дросселирования вакуум-камер под горном:

$$A = \frac{\Delta P_{\text{сл}}}{Hw^{1,59}}, \quad (8)$$

с учетом того, что сопротивление  $\Delta P_{\text{сл}}$  составляет примерно 95 % величины разрежения в вакуум-камерах ( $\Delta P_{\text{вк}}$ ).

В периоде горения твердого топлива под горном в слой поступает кислорода меньше, чем в основном периоде спекания. При этом снижается количество выгоревшего углерода из шихты и возможно рассогласование фронтов горения и теплопередачи с уменьшением температуры в слое.

Для оценки влияния содержания кислорода в продуктах сгорания в горне на количество выгоревшего углерода в слое выполнили обработку данных промышленных исследований сотрудников ВНИИМТ на агломашинах Орско-Халиловского (ОХМК), Магнитогорского (ММК), Карагандинского (КарМК) металлургических комбинатов, заводов им. А. К. Серова, Коммунарского (КомМЗ) и НПО «Тулачермет», Качканарского (КачГОК) и Высокогорского (ВГОК) ГОКов, Бакальского рудоуправления (БРУ).

Общее количество горючего углерода, перешедшего в газ, находили по его доле и расходу шихты без возврата и относили к объему, просасываемого через слой газа. Количество углерода, выгоревшего под горном, рассчитывали как разность углерода на входе и выходе из слоя. Результаты по определению количества выгоревшего углерода из слоя под горном приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

## Результаты по определению количества выгоревшего углерода

Наименование предприятия	ОХМК			Кач ГОК	БРУ	им.А.К. Серова	
	1	2	3				
№ исследования				4	5	6	
Площадь спекания агломашин, м <sup>2</sup>	75,0	84,0	84,0	219,0	78,1	50,0	
Длина агломашины, м	30	30	30	54,75	31,25	25	
Длина горна, м	4,25	4,25	4,25	15,5	4,75	5,0	
Вид топлива горна	П-Д	П-Д	П-Д	П	П	П	
Теплота сгорания, МДж/м <sup>3</sup>	10,6	12,6	13,4	33,4	33,4	33,4	
Содержание в продуктах сгорания топлива горна, %	CO <sub>2</sub> ex	10,91	9,87	9,51	6,32	6,32	6,32
	O <sub>2</sub> ex	7,89	8,32	8,47	9,80	9,80	9,80
Скорость фильтрации через слой, м/с	0,309	0,282	0,297	0,236	0,347	0,408	
Общее количество горючего углерода, перешедшее в газ,	кг/ч	5508,4	5521,2	5174,0	10602	7623,7	5070,4
	кг/м <sup>3</sup>	0,0660	0,0647	0,0576	0,0606	0,0814	0,0690
Количество углерода, перешедшее в газ под горном,	кг/м <sup>3</sup>	0,0542	0,0517	0,0462	0,0505	0,0698	0,0571
	%	82,1	79,9	80,2	83,3	85,7	82,8
Наименование предприятия	КомМЗ	Тула-чермет	ВГОК	ММК	КарМК		
№ исследования	7	8	9	10	11	12	
Площадь спекания агломашин, м <sup>2</sup>	89,6	82,2	75,0	62,5	75	75	
Длина агломашины, м	32	30	25	25	30	30	
Длина горна, м	6,0	4,0	5,0	5,0	4,0	6,0	
Вид топлива горна*	К-Д	П-Д	П	К	К-Д	К	
Теплота сгорания, МДж/м <sup>3</sup>	10,2	9,4	33,4	17,0	5,6	17,0	
Содержание в продуктах сгорания топлива горна, %	CO <sub>2</sub> ex	8,57	11,77	6,32	4,94	15,63	4,94
	O <sub>2</sub> ex	9,19	7,53	9,80	10,79	6,07	10,79
Скорость фильтрации через слой, м/с	0,253	0,340	0,216	0,336	0,399	0,379	
Общее количество горючего углерода, перешедшего в газ,	кг/ч	5688,8	7213,4	4339,4	4611,8	5443,4	3857,9
	кг/м <sup>3</sup>	0,0744	0,0717	0,0744	0,0610	0,0583	0,0435
Количество углерода, перешедшего в газ под горном,	кг/м <sup>3</sup>	0,0577	0,0433	0,0613	0,0507	0,0272	0,0368
	%	77,6	60,4	82,4	83,1	46,7	84,6

\*П – природный газ, К – коксовый газ, Д – доменный газ, К-Д – коксодоменная смесь, П-Д – природно-доменная смесь.

Как видно из табл. 1 и 2, при спекании разных по составу шихт содержания кислорода в

продуктах сгорания ( $O_2$ ) существенно влияет на количество горючего углерода шихты, перешедшего в газ под горном ( $\Delta C$ ). В результате обработки экспериментальных данных в диапазоне изменения  $O_2 = 6-17\%$  получена следующая зависимость:

$$\Delta C = 11,77O_2 - 0,352O_2^2, \% \quad (R^2 = 0,8495). \quad (9)$$

Таким образом, скорость фильтрации газа через слой в периоде горения твердого топлива под горном ( $w_{зж}$ ), и скорость фильтрации в основном периоде ( $w$ ) связаны соотношением, м/с:

$$w_{зж} = 0,01(11,77O_2 - 0,352O_2^2)w. \quad (10)$$

Таблица 2

Результаты по определению количества выгоревшего углерода в обычном режиме и при подаче кислорода (КарМК)

Вид топлива горна		Коксовый газ							
Теплота сгорания, МДж/м <sup>3</sup>		17,3							
Режим		Обычный				С подачей кислорода			
Скорость фильтрации через слой, м/с		0,210				0,208			
Секции горна		весь горн	I	II	III	весь горн	I	II	III
№ исследования		13	14	15	16	17	18	19	20
Длина, м		17,4	8,4	6	3	17,4	8,4	6	3
Содержание в продуктах сгорания топлива горна, %	$CO_{2\text{вх}}$	4,0	4,4	3,4	4,2	4,98	5,7	3,6	5,7
	$O_{2\text{вх}}$	12,8	11,6	13,3	15,6	15,5	14,3	16,4	17,4
Общее количество углерода, кг/ч		17442				17498			
перешедшее в газ, кг/м <sup>3</sup>		0,0739				0,0749			
Количество углерода, перешедшее в газ под горном,	кг/м <sup>3</sup>	0,0669	0,0641	0,0674	0,0733	0,0726	0,0707	0,0740	0,0751
	%	90,5	86,7	91,2	99,2	96,9	94,4	98,8	100,3

По скорости фильтрации в режиме зажигания и коэффициенту гидравлического сопротивления слоя (8) определяется сопротивление слоя в режиме зажигания ( $\Delta P_{зж}$ ). Затем рассчитывается величина дросселирования вакуум-камер в режиме зажигания, кПа:

$$\Delta P_{др} = \Delta P_{вк} - \Delta P_{зж}. \quad (11)$$

В отличие от основного периода спекания исходная шихта обладает существенно большей газопроницаемостью. По данным Ю. А. Фролова [2] коэффициент гидравлического сопротивления на исходной шихте ( $\zeta_{исх}$ ) в 1,7-1,8 раза меньше коэффициента гидравлического сопротивления в режиме спекания:

$$\zeta_{исх} = A/(1,7...1,8). \quad (12)$$

При этом сопротивление слоя исходной шихты, кПа

$$\Delta P_{исх} = \zeta_{исх} H w_{зж}^{1,59}, \quad (13)$$

а величина дросселирования первой вакуум-камеры, кПа

$$\Delta P_{др1} = \Delta P_{вк} - \Delta P_{исх}. \quad (14)$$

Дросселирование первой вакуум-камеры и плавный нагрев исходной шихты предотвращают усадку слоя и положительно влияют на газопроницаемость шихты в основном периоде спекания.

Дросселирование целесообразно осуществлять в две ступени. В нижней части патрубка вакуум-камеры устанавливается стационарное сужающее устройство, рассчитанное на величину минимально необходимого снижения разрежения, в верхней части патрубка – мотыльковый шибер для поддержания разрежения в вакуум-камере в автоматическом режиме.

Таким образом, проведенная обработка данных экспериментальных исследований показала, что количество кислорода в продуктах сгорания, ограниченное необходимостью поддержания высокой температуры в горне, лимитирует скорость горения твердого топлива в слое под горном, и, как следствие, производительность агломашины. Количество углерода твердого топлива, перешедшего в газ из слоя под горном, в зависимости от содержания кислорода в продуктах сгорания может быть определено из уравнения (9).

Разработанная методика позволяет произвести расчет продолжительности зажигания шихты с учетом шихтовых материалов и вида газообразного топлива, сжигаемого в горне.

#### Список использованных источников

1. Герасимов Л. К., Дружинин Г. М., Хамматов И. М. и др. Опыт разработки и освоения зажигательных горнов агломерационных машин // Сталь. 2010. № 3. С. 23–27.
2. Фролов Ю. А. Теплотехнические аспекты процесса агломерации // Сталь. 2003. № 12. С. 2–11.

УДК 669.045

*А. И. Цаплин, В. Н. Нечаев*

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
г. Пермь, Россия

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В РЕАКТОРЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ГУБЧАТОГО ТИТАНА ПРИ ПОРЦИОННОЙ ПОДАЧЕ ИСХОДНОГО СЫРЬЯ

#### Аннотация

*На основе математической модели, описывающей динамику неравновесного тепло-массообмена в технологическом процессе восстановления титана из его тетрахлорида в расплаве магния, приведены результаты численного моделирования – поля температур и функции тока с учетом сопряженных процессов на границе расплава магния с блоком титана.*

*Ключевые слова: губчатый титан, расплав магния, теплообмен, математическая модель.*