

УДК 622.785

Д.А. Ковалёв, Н.Д. Ванюкова, А.Ю. Худяков, М.Н. Бойко

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ  
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА СУШКИ ОКАТЫШЕЙ НА  
ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЦЕССА**

*Анотація. З використанням методу математичного моделювання, було проведено дослідження впливу основних параметрів високотемпературного режиму сушки обкотишів на зміну температури і вологості в шарі, а також зміст FeO в обкотишах, по висоті шару (на відстанях 60,120,180 мм від колосникової решітки). Отримано поліноміальні моделі, які описують вказані залежності, проведено їх комплексний аналіз.*

**Состояние и актуальность проблемы.** Отечественное производство окускованного железорудного сырья для доменной плавки, на современном этапе своего существования, переживает далеко не самые лучшие времена. Печально известный мировой экономический кризис, жесткая конкуренция со стороны зарубежных производителей, наконец, недопустимо высокая степень устарелости и износа технологического оборудования – вот факторы, которые наносят поистине нокаутирующие удары этой отрасли металлургии. Чтобы достойно выглядеть в уже сложившейся неблагоприятной обстановке, необходимо принимать разумные решения, а не продолжать разрушительную эксплуатацию агрегатов, которые давно исчерпали свои ресурсы. Нужны ремонты и модернизация. Однако, за последние 20 лет, отсутствие достаточного финансирования для проведения этих мероприятий стало постыдной нормой [1]. Напрашивается очевидный вывод – необходимая модернизация, в таких условиях, должна быть предельно дешевой. Обеспечения высокого качества готовой продукции и интенсификации процессов производства, нужно достигать за счет роста эффективной мощности производственных агрегатов, без использования дорогостоящих изменений в их конструкции, поскольку они неизбежно связаны с повышением металлоемкости, трудностями и затратами при монтаже, ремонте и эксплуатации.

---

© Ковалёв Д.А., Ванюкова Н.Д., Худяков А.Ю., Бойко М.Н., 2010

В области производства железорудных окатышей, одним из способов реализации данной концепции, является применение режимов высокотемпературной сушки железорудных окатышей, позволяющих интенсифицировать процесс обжига на конвейерных машинах путем совмещения сушки и окисления окатышей. Достоинства и особенности данной технологии подробно рассмотрены авторами в [2], тем не менее здесь нельзя не отметить, что она в положительную сторону отличается от имеющихся предложений (например, двухслойной загрузки окатышей на конвейерную обжиговую машину [3]), тем, что, преследуя те же цели, не требует значительных капиталовложений, а, значит, полностью соответствует требованиям сегодняшнего дня.

**Постановка задачи.** Реализация технологии сушки окатышей в высокотемпературном режиме невозможна без четкого представления о результатах и механизме взаимного воздействия основных параметров процесса на ключевые показатели технологического режима сушки, поскольку как обоснование, так и развитие этой технологии, требует наличия достоверных данных об основных закономерностях такого влияния. В рамках данной работы, поставлена следующая цель: с помощью динамической математической модели [4] изучить и описать особенности влияния скорости подачи газа-теплоносителя, его температуры, и продолжительности сушки на температуру окатышей в слое, их влажность и содержание в них оксида железа (II) по высоте слоя.

**Анализ достижений и публикаций.** Многие авторы [5,6,7], так или иначе, занимались вопросами, изучаемыми в этой работе, однако комплексного их исследования, не проводили. Между тем, тщательный и всесторонний анализ, с последующим получением стройной картины, описывающей рассматриваемые здесь закономерности, будет полезен в разработке новых и совершенствовании существующих технологий работы обжиговых агрегатов.

**Изложение материала и результаты.** Методика исследования. Для проведения экспериментальной части данной работы, была использована динамическая математическая модель [4], основанная на описании реальных физико-химических и тепловых механизмов, вовлеченных в процесс обжига окатышей. Превращения в этой

системе анализируются с позиций кинетики, основанной на кинетических уравнениях. Для общего случая топохимического реагирования модель массопереноса включает химическое взаимодействие и диффузию газового компонента в пограничной пленке и через пористый слой продукта реагирования.

В процессе исследования были приняты следующие исходные данные: основность окатышей – 0,7 ед., крупность – 10-20 мм, влажность - 10% высота слоя – 250 мм. Скорость фильтрации газа-теплоносителя – 0,6; 0,9 и 1,2 м/с, а его температура – 300, 600, 900 °С. Продолжительность сушки равнялась 3,6 и 9 минут. Замеры температуры слоя, влажности окатышей и содержания в них FeO проводились на расстояниях 60, 120 и 180 мм от колосниковой решетки.

**Результаты исследования.** Для получения полиномиальных зависимостей, описывающих влияние температуры газа, скорости его фильтрации и времени сушки на температуру слоя, его влажность и содержание окиси железа (II), были реализованы трехфакторные эксперименты с использованием метода центрального композиционного ортогонального планирования второго порядка (план Бокса-Бенкина). Была принята следующая кодировка факторов: температура горна - X1; скорость фильтрации – X2; содержание бентонита – X3. Интервалы варьирования и величины уровней факторов, приведенные к условиям стандартной матрицы, представлены в таблице 1. Расчет коэффициентов регрессии полиномов и их ошибок был проведен по стандартным формулам [8, 9].

В результате были получены следующие полиномиальные модели:

1) зависимости температуры в слое от скорости газа, температуры и времени сушки на расстоянии

- 180 мм от колосниковой решетки:

$$T_{180} = -1140,88 + 0,111667x_1 + 1096,667x_2 + 190,0833x_3 - 0,18611x_1x_2 + 0,073611x_1x_3 - 59,7222x_2x_3 + 0,000554x_1^2 - 229,167x_2^2 - 10,7917x_3^2;$$

- 120 мм от колосниковой решетки:

$$T_{120} = -429,125 - 0,53917x_1 + 1172,5x_2 - 11,4167x_3 + 0,0916x_1x_2 + 0,159167x_1x_3 + 0,277x_2x_3 + 0,00011x_1^2 - 623,611x_2^2 - 2,01389x_3^2;$$

- 60 мм от колосниковой решетки:

$$T_{60} = 386,25 - 1,41833x_1 + 177,5x_2 - 49,41667x_3 + 0,82777x_1x_2 + 0,11277x_1x_3 + 35,555x_2x_3 + 0,000288x_1^2 - 394,444x_2^2 - 1,3888x_3^2.$$

Таблица 1

Натуральные значения факторов для уровней

	X1, °C	X2, м/с	X3, мин
Уровень			
верхний	900	1,2	9
нулевой	600	0,9	6
нижний	300	0,6	3
Интервал варьирования	300	0,3	3

2) зависимости влажности окатышей в слое от скорости газа, температуры и времени сушки на расстоянии

- 180 мм от колосниковой решетки:

$$W_{180} = 12,092 - 0,00958x_1 - 6,667x_2 - 1,30833x_3 + 0,002777x_1x_2 + 0,000889x_1x_3 + 0,61111x_2x_3;$$

- 120 мм от колосниковой решетки:

$$W_{120} = 51,0125 - 0,044583x_1 - 39,25x_2 - 4,658333x_3 + 0,0916667x_1x_2 + 0,001361x_1x_3 + 1,41666x_2x_3 + 0,00001125x_1^2 + 7,916x_2^2 + 0,156944x_3^2;$$

- 60 мм от колосниковой решетки:

$$W_{60} = 64,175 - 0,0565x_1 - 47,20833x_2 - 5,5208x_3 + 0,010555x_1x_2 + 0,000667x_1x_3 + 0,472222x_2x_3 + 0,00002569x_1^2 + 19,8611x_2^2 + 0,276389x_3^2.$$

3) зависимости содержания FeO в окатышах от скорости газа, температуры и времени сушки на расстоянии

- 180 мм от колосниковой решетки:

$$FeO_{180} = 30,85388 - 0,01184x_1 + 6,63125x_2 + 0,30633x_3 - 0,00153x_1x_2 - 0,00222x_1x_3 + 0,315278x_2x_3 - 6,41389x_2^2 - 0,05122x_3^2;$$

- 120 мм от колосниковой решетки:

$$FeO_{120} = 25,5775 + 0,01344x_1 + 0,5125x_2 + 1,05375x_3 - 0,004x_1x_2 - 0,002294x_1x_3 - 0,186111x_2x_3 - 0,000017x_1^2 - 0,01389x_2^2 - 0,057361x_3^2;$$

- 60 мм от колосниковой решетки:

$$FeO_{60} = 9,745 + 0,037475x_1 + 20,654x_2 + 1,4229x_3 - 0,00661x_1x_2 - 0,00364x_1x_3 - 0,05833x_2x_3 - 0,0000241x_1^2 - 10,4583x_2^2 - 0,03403x_3^2.$$

Адекватность полученных математических моделей реальному процессу, проверяли с помощью критерия Фишера. Значения критериев Фишера составили:

1) для полинома зависимости температуры в слое от скорости газа, температуры и времени сушки на расстоянии

- 180 мм от колосниковой решетки:

$$F_{расч} = 3,49 < 3,9 = F_{0.05табл.};$$

- 120 мм от колосниковой решетки:

$$F_{расч} = 1,82 < 3,9 = F_{0.05табл.};$$

- 60 мм от колосниковой решетки:

$$F_{расч} = 3,22 < 3,9 = F_{0.05табл.}.$$

2) для полинома зависимости влажности окатышей в слое от скорости газа, температуры и времени сушки на расстоянии

- 180 мм от колосниковой решетки:

$$F_{расч} = 2,196 < 3,9 = F_{0.05табл.};$$

- 120 мм от колосниковой решетки:

$$F_{расч} = 1,685 < 3,9 = F_{0.05табл.};$$

- 60 мм от колосниковой решетки:

$$F_{расч} = 3,388 < 3,9 = F_{0.05табл.}.$$

3) для полинома зависимости влажности окатышей в слое от скорости газа, температуры и времени сушки на расстоянии

- 180 мм от колосниковой решетки:

$$F_{расч} = 1,26 < 3,9 = F_{0.05табл.};$$

- 120 мм от колосниковой решетки:

$$F_{расч} = 1,54 < 3,9 = F_{0.05табл.};$$

- 60 мм от колосниковой решетки:

$$F_{расч} = 1,02 < 3,9 = F_{0.05табл.}.$$

Поскольку расчетные значения критериев Фишера меньше табличных для соответствующего уровня значимости и степеней свободы [8], адекватность моделей обоснована и, значит, полученные полиномы достаточно точно описывают процессы изменения температуры и влажности окатышей в слое и содержания в них FeO под влиянием выбранных факторов.

Полученные полиномиальные зависимости для выбранных уровней факторов в табличном исполнении представлены на рис. 1. В целях большей наглядности, на рис. 2 ,3, 4 размещены графические

отображения этих данных, сгруппированные таким образом, что на рис. 2 изображены зависимости температуры окатышей по высоте слоя от температуры горна при разных скоростях фильтрации и времени сушки 3,6,9 мин.; на рис.3 – зависимости содержания влаги в окатышах по высоте слоя от тех же факторов, и на рис.4 – зависимости содержания FeO в окатышах по высоте слоя от температуры горна при разных скоростях фильтрации и времени сушки 3,6,9 мин.

Анализ приведенных на рис.2 зависимостей, подтверждает имеющиеся данные [10] о качественном характере влияния рассматриваемых факторов на основные показатели процесса сушки железорудных окатышей. Повышение температуры газа-теплоносителя, скорости его фильтрации и продолжительности сушки увеличивает количество тепла, вносимого в слой, и, следовательно, способствует росту температуры окатышей. Следует отметить, что при времени сушки 3 минуты, температура нижних горизонтов слоя не превысила 100 °С во всем диапазоне скоростей фильтрации от 0,6 до 1,2 м/с. При времени сушки 9 минут и температуре газа 900 °С, наблюдался перегрев верха слоя окатышей до 924-980 °С (в зависимости от скорости фильтрации теплоносителя) вследствие окисления магнетита. Также имел место незначительный, до 30°С, перегрев верха слоя при времени сушки 6 минут и температуре горна 900°С, в то же время, при длительности сушки 3 минуты, температура на расстоянии 180 мм. от колосниковой решетки составила 326-650°С. В целом, можно сделать вывод о том, что ведение процесса при высоких температурах (до 900°С) во временном диапазоне от 6 до 9 минут, со значительным запасом, позволяет развить технологически приемлемые температуры в слое окатышей, а 3 минут сушки для этого явно недостаточно.

		а) Температура слоя, °С										
		время сушки, мин										
		3,00			6,00			9,00				
		скорость газа, м/с			скорость газа, м/с			скорость газа, м/с				
		0,60	0,90	1,20	0,60	0,90	1,20	0,60	0,90	1,20		
Температура сушки, °С	300,00	70	100,00	120,00	150,00	192,00	259,00	199,00	278,00	295,00	180,00	Высота в слое, мм
		60	60	80	60	70	115	102	157	263	120,00	
		60	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	80,00	120,00	159,00	
	600,00	108	288,00	397,00	407,00	521,00	576,00	517,00	530,00	591,00	180,00	
		60	90	116	150	320	381	375	405	432	120,00	
		60,00	60,00	60,00	80,00	178,00	205,00	136,00	207,00	264,00	60,00	
	900,00	326,00	537,00	650,00	875,00	933,00	917,00	924,00	980,00	960,00	180,00	
		60,00	180,00	391,00	416,00	478,00	504,00	800,00	850,00	835,00	120,00	
		60,00	60,00	80,00	128,00	398,00	426,00	504,00	526,00	554,00	60,00	

		б) Влажность слоя, %										
		время сушки, мин										
		3,00			6,00			9,00				
		скорость газа, м/с			скорость газа, м/с			скорость газа, м/с				
		0,60	0,90	1,20	0,60	0,90	1,20	0,60	0,90	1,20		
Температура сушки, °С	300,00	5,4	3,20	0,70	1,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	180,00	Высота в слое, мм
		8,2	7,3	6,3	6,9	4,8	0	3,5	0,9	0	120,00	
		12,5	12,00	11,40	11,30	9,20	7,50	9,80	4,00	2,50	60,00	
	600,00	2,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	180,00	
		6,8	5,4	1,7	1	0	0	0	0	0	120,00	
		10,60	9,90	8,90	5,30	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	60,00	
	900,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	180,00	
		3,40	1,50	0,00	0	0	0	0	0	0	120,00	
		8,00	5,60	3,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	60,00	

		в) Содержание FeO, %										
		время сушки, мин										
		3,00			6,00			9,00				
		скорость газа, м/с			скорость газа, м/с			скорость газа, м/с				
		0,60	0,90	1,20	0,60	0,90	1,20	0,60	0,90	1,20		
Температура сушки, °С	300,00	26,461	26,407	26,188	25,8	25	24,552	23,8	22,85	22	180,00	Высота в слое, мм
		27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	26,4	25,1	24,3	24	120,00	
		27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	26,7	26	25,4	60,00	
	600,00	22,87	21,36	19,096	18,5	17,65	16,368	13,56	11,22	10,921	180,00	
		24,68	23,98	23	22,1	20,85	19,42	18	17,1	15,65	120,00	
		27	26,22	25,31	25,6	24	22,97	20,3	19,26	18,4	60,00	
	900,00	16,368	15,66	14,59	10,00	9,23	8,2	5	4,1	2,78	180,00	
		18,87	17,46	16,32	12,98	11,54	10,64	7,7	6,2	5,3	120,00	
		25	23,6	19,56	15,67	14,248	13,29	10	9,2	8,184	60,00	

Рисунок 1 - Влияние температуры сушки, скорости фильтрации и времени сушки на: а) – температуру окатышей в слое; б) – влажность окатышей; в) – содержание FeO в окатышах прочности на сжатие брикетов и окатышей

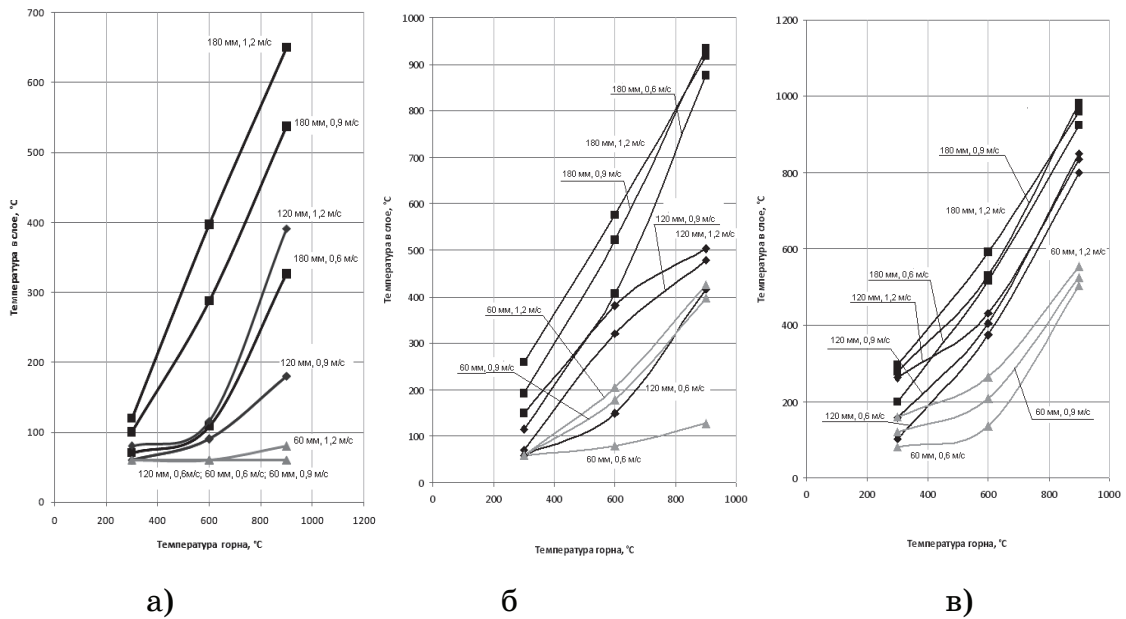


Рисунок 2 - Зависимость температуры в слое от температуры горна на расстояниях 60, 120, 180 мм от колосниковой решетки при скоростях фильтрации 0,6; 0,9; 1,2 м/с и времени сушки:

а) - 3 минуты; б) – 6 минут; в) – 9 минут

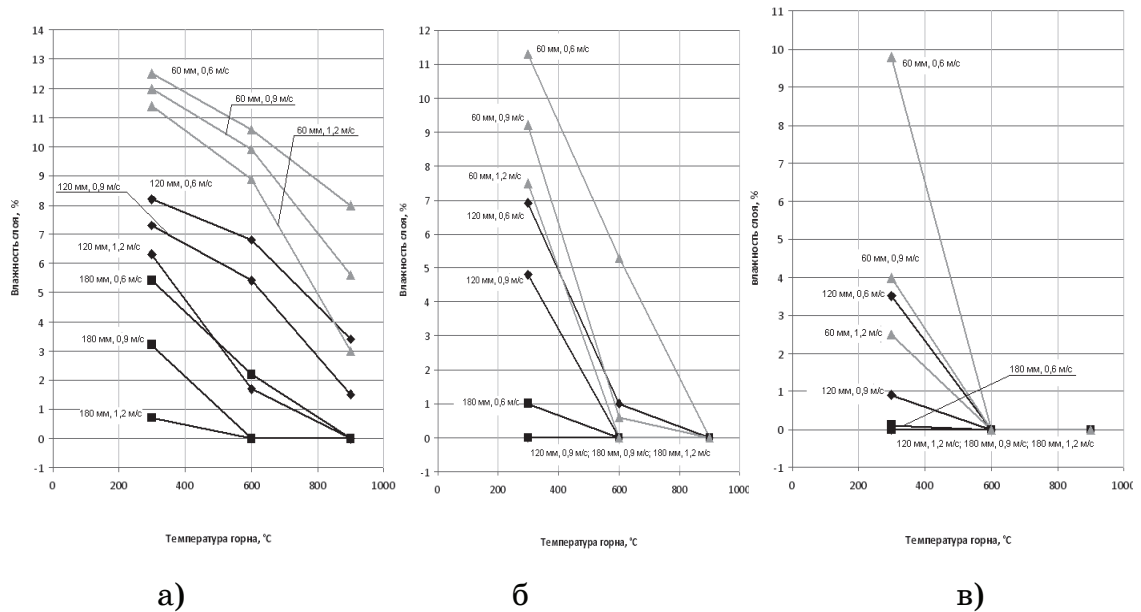


Рисунок 3 - Зависимость влажности окатышей в слое от температуры горна на расстояниях 60, 120, 180 мм от колосниковой решетки при скоростях фильтрации 0,6; 0,9; 1,2 м/с и времени сушки:

а) - 3 минуты; б) – 6 минут; в) – 9 минут



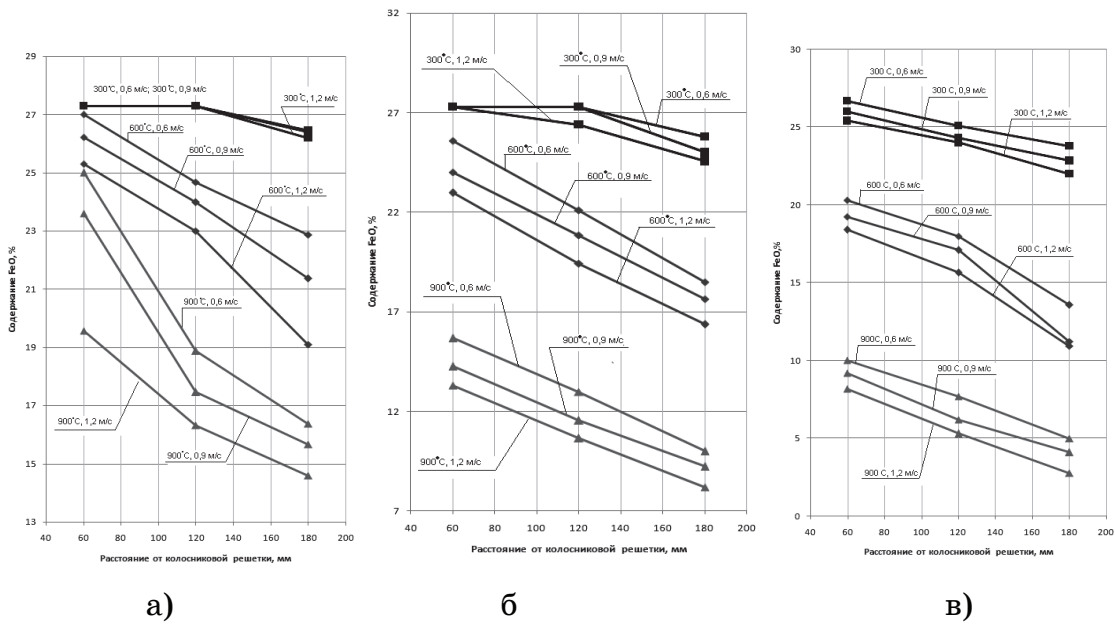


Рисунок 4 - Зависимость содержания FeO в окатышах от температуры горна на расстояниях 60, 120, 180 мм от колосниковой решетки при скоростях фильтрации 0,6; 0,9; 1,2 м/с и времени сушки: а) - 3 минуты; б) – 6 минут; в) – 9 минут

Графики, изображенные на рис.3, свидетельствуют о наличии прямо пропорциональной зависимости между влажностью окатышей и избранными для исследования факторами (температура горна, скорость фильтрации, время сушки). При температуре сушки 300°C наблюдается переувлажнение нижних горизонтов слоя окатышей, причем, чем ниже скорость фильтрации газа и меньше время сушки, тем сильнее степень его развития. Так, при времени сушки 9 минут, окатыши низа слоя не переувлажняются, а при 3 минутах (скорость фильтрации, 0,6 м/с, и температура горна, 300°C,- постоянны в обоих случаях) величина переувлажнения достигает своего максимального значения и составляет 25 %. По всей высоте слоя влага фактически полностью, до содержания около 1%, удаляется при температуре газа 600°C и времени сушки 6 минут, для всех скоростей фильтрации, кроме 0,6 м/с. Если реализовывать процесс при 900°C, то за 6 минут сушки, влага без остатка испаряется из всех горизонтов слоя, вместе с тем, при этой температуре и после 3 минут сушки, степень удаления влаги в слое достигает значительных отметок: верх слоя высушивается полностью, середина – до 3,4%, при самой низкой скорости фильтрации (0,6 м/с), а в нижних горизонтах и близко нет

переувлажнения. Эти данные, а также графики, изображенные на рис. 2, позволяют сделать вывод о том, что при ведении процесса в высокотемпературном режиме, влага успевает испариться задолго до истечения 6-ти минут (об этом свидетельствуют и высокие температуры в слое – низ слоя разогревается до  $400^{\circ}\text{C}$  ). На наш взгляд, целесообразно установить такой режим, чтобы в начале сушки температура горна составляла  $300^{\circ}\text{C}$ , а затем, плавно поднимаясь, достигла  $900^{\circ}\text{C}$  на 6-ой минуте. Осуществление этой рекомендации позволит избежать переувлажнения в начальном периоде сушки и, не понижая качества окатышей, полностью удалить из них влагу к 6-ой минуте ведения процесса.

Изменение содержания остаточного FeO в окатышах по высоте слоя в зависимости от температуры, скорости фильтрации газа и времени сушки, отображено на рис. 4. При температуре  $300^{\circ}\text{C}$ , окатыши окисляются в незначительной степени (до 22% содержания FeO вверху слоя при максимальных времени сушки и скорости фильтрации). С повышением температуры газа-теплоносителя и скорости его фильтрации, степень содержания FeO в окатышах значительно снижается, и в высокотемпературном режиме ( $900^{\circ}\text{C}$  ) достигает значений 2,78; 5,3 и 8,184 % для окатышей на расстояниях 180,120 и 60 мм от колосниковой решетки, при скорости фильтрации 1,2 м/с. Таким образом, при росте всех избранных для исследования факторов, содержание остаточного FeO падает, что объясняется очевидным образом: повышение температуры слоя увеличивает подвижность частиц в кристаллической решетке, а повышение скорости фильтрации газа – парциальное давление кислорода, необходимого для протекания реакции окисления магнетита.

**Выводы.** Проведенным исследованием установлено, что сушка окатышей в высокотемпературном режиме, позволяет одновременно осуществлять сушку и окисление окатышей, без их разрушения и с достижением предельно низкого содержания FeO. Реализация этих двух процессов в одной технологической зоне даст возможность повысить производительность обжиговой машины без ухудшения качества окатышей и дорогостоящих конструктивных изменений.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Основные тенденции и практика совершенствования технологии и оборудования для производства окучкованного сырья в России / Бруев В.П., Гриненко В.И., Евстюгин С.Н. и др.// Сталь.- 2006.- №6.- с.5-9.
2. Исследование и разработка режимов высокотемпературной сушки окатышей / Ковалев Д.А., Худяков А.Ю.// // Новини науки Придніпров'я. – 2010. – №1.– С. 176 – 180.
3. Пат. 2173824 РФ. Конвейерная обжиговая машина для термообработки окатышей / В.М. Абзалов, В.Н. Ашеулов, В.А. Барсов и др.- опубл. 20.09.2001. бюл. 26
4. Разработка динамической математической модели для управления обжигом углеродсодержащих железорудных окатышей / Ковалёв Д.А., Ванюкова Н.Д., Бойко М.Н. // Системні технології : регіон. міжвуз. зб. наук. праць. .– 2008г – Дніпропетровськ: Системні технології, № 1. – с. 93-102.
5. Математическое моделирование процесса слоевой сушки железорудных окатышей/ Майзель Г.М., Буткарев А.П., Шкляр Ф.Р. и др.// Сталь.- 1995.- №4.- с.11-15.
6. Братчиков С.Г., Берман Ю.А., Белоцерковский Я.Л., Бабошин В.М., Майзель Г.М. Теплотехника окучкования железорудного сырья.- М.: Металлургия, 1970.-344с.
7. Кузнецов Р.Ф., Майзель Г.М., Буткарев А.П. и др. // Бюл. ин-та «Черметинформация» - 1973 - №8 – с. 20-22.
8. Ковшов В.Н. Постановка инженерного эксперимента. – Киев-Донецк: Вища школа. Головное изд-во, 1982. – 120 с.
9. Фролов В.Ф. Моделирование сушки дисперсных материалов.- Л.: Химия, 1987 – 356 с.
10. Интенсификация процессов сушки и обжига окатышей/ Петров А.В., Бережной Н.Н., Воскеричян Н.В. и др.// Сталь.- 1976.- №6.- с. 491-494.

Получено 01.10.2010г.