

УДК 622.788

Д.А. Ковалёв, Н.Д. Ванюкова, М.В. Ягольник, А.Ю. Худяков

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ОКАТЫШЕЙ

Экспериментальным путем исследована сушка железорудных окатышей, содержащих твердое топливо. Проведено математическое описание процесса и получены модели (полиномы), описывающие зависимость продолжительности сушки и качества высушенных окатышей от содержания твердого топлива, бентонита и температуры сушки. Выполнен графический и аналитический анализ влияния указанных факторов на основные технологические параметры процесса сушки рудно-топливных окатышей.

Ключевые слова: углеродсодержащие окатыши, сушка, прочность на сжатие, бентонит.

Експериментальним шляхом досліджена сушка залізорудних обкотишів, що містять тверде паливо. Проведено математичний опис процесу та отримані моделі (поліноми), що описують залежність тривалості сушки та якості висушених обкотишів від вмісту твердого палива, бентоніту і температури сушки. Виконано графічний та аналітичний аналіз впливу факторів на основні технологічні параметри процесу сушки рудно-паливних обкотишів.

Drying of iron-ore pellets, containing a hard fuel was investigated experimentally. Mathematical description of process was conducted and models (polynomials), which describe dependence of duration of drying and quality of dried up pellets on maintenance of hard fuel, bentonite and temperature of drying, are got. The graphic and analytical analysis of influence of the indicated factors is executed on the basic technological parameters of process of drying of ore-fuel pellets.

Экспериментальным путем исследована сушка железорудных окатышей, содержащих твердое топливо. Проведено математическое описание процесса и получены модели (полиномы), описывающие зависимость продолжительности сушки и качества высушенных окатышей от содержания твердого топлива, бентонита и температуры сушки. Выполнен графический и аналитический анализ влияния указанных факторов на основные технологические параметры процесса сушки рудно-топливных окатышей.

Состояние проблемы. Производство железорудных окатышей с добавками твердого топлива является, на сегодняшний день, одним из наиболее перспективных направлений совершенствования способов получения окучкованного сырья. Преимущества использования данной технологии, доказанные работами ряда авторов [1,2], очевидны и неоспоримы. Вот наиболее значимые из них:

- увеличение производительности зоны обжига конвейерной обжиговой машины для производства окатышей на 20-25%, при добавке 0,6-0,8%

антрацита в шихту, за счет повышения средней скорости нагрева на 55 °С/мин.;

- прирост производства чугуна на 8,7-11,1% и снижение расхода кокса на 3,68-6,99%, при подаче в доменную печь 20-25% углеродсодержащих окатышей вместо окисленных, благодаря более высокой степени восстановления и металлизации первых (на 16% и 5% выше, соответственно).

Кроме того, использование углеродсодержащих окатышей в качестве шихты для процессов получения губчатого железа и жидкофазного восстановления в шахтных, трубных, вращающихся печах и других агрегатах, по сравнению с остальными видами сырья, более предпочтительно.

Несмотря на то, что к настоящему моменту востребованная и многообещающая технология производства окатышей, содержащих углерод, достаточно изучена, некоторые существенные составляющие процесса остаются неучтенными. В частности, мало внимания было уделено исследованию такой важной технологической операции, как сушка, повышение эффективности которой, является значительным резервом совершенствования технологии обжига окатышей с добавками твердого топлива.

Анализ достижений и публикаций. Процесс сушки непосредственно влияет на длительность пребывания окатышей на конвейерной обжиговой машине и сохранение целостности как отдельных окатышей, так и всего слоя в целом; таким образом, он во многом определяет газодинамические условия работы последующих зон, а, значит, оказывает непосредственное влияние на производительность обжиговой машины, расход природного газа (мазута) и электроэнергии [3], кроме того – дефекты структуры окатышей, приобретенные во время сушки «не залечиваются» в ходе дальнейшей тепловой обработки и наследственно передаются конечному продукту, негативно сказываясь на качестве готовых обожженных окатышей [4].

Осознавая значительность воздействия работы зоны сушки на успешность реализации всего процесса обжига, авторы большинства работ, посвященных технологии производства углеродсодержащих окатышей [1,5], всё-таки не полностью рассмотрели этот вопрос.

Постановка задачи. Несомненно, что разумная интенсификация процесса сушки, предполагающая достижение максимальной скорости удаления влаги из окатышей без ущерба для их качества, является важным технологическим заданием. Поставленная задача требует тщательного изучения процессов теплообмена и массообмена при сушке, и определения зависимости основных параметров процесса от ряда

технологических факторов. В рамках данной работы определяется влияние содержания твердого топлива, температуры сушки и количества бентонитовой глины в составе железорудных окатышей на длительность процесса сушки и прочность окатышей в высушенном состоянии.

Методика исследования. В исследовании использовали шихтовые материалы, химический состав которых приведен в таблице 1. Крупность материалов отвечала общепринятым технологическим требованиям.

В качестве опытного материала, при проведении экспериментов, вместо окатышей были использованы брикеты. Такой выбор обусловлен нецелесообразностью использования чашевого гранулятора, из-за отсутствия необходимости в больших количествах исследуемого материала, а также возможностью сохранения постоянства заданных состава и плотности лабораторных брикетов, что в случае получения окатышей представляет собой некоторую сложность.

Таблица 1

Химический состав исходных материалов

Материал	Feоб.	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	П.П.П
Железорудный концентрат	63,33	28,95	58,31	9,85	0,74	0,34	0,65	0,65
Бентонит ЦГОК	4,3	0,31	5,56	60,9	1,89	1,76	13,6	11,7
Известняк	0,28	-	0,40	1,34	53,22	0,92	0,56	43,56
Зола кокса*	12,66	-	18,09	49,42	4,48	1,40	26,61	-

*Технический состав кокса: А = 12,4 %; V = 1,5 %; S = 3,0 %; W = 2,2%.

Дозирование компонентов для изготовления брикетов осуществлялось в соответствии с планом проведения экспериментов, детальное рассмотрение которого проведено ниже. Основность всех брикетов была постоянной, и составляла 0,4 ед.

Смешивание шихт проводили до полной гомогенизации массы, путем послойной укладки материалов и перемешивания слоёв между собой.

Сырые брикеты получали в лабораторных условиях на разрывной машине МР-500, при давлении брикетирования, равном 282 кгс/бр. Влажность брикетов всех составов была равной 9,5 %, а диаметр 15 мм.

Для сушки брикетов использовали экспериментальную термогравиметрическую установку, на которой 5 влажных брикетов, в плетеной корзине из нихромовой проволоки, подвешенной к коромыслу весов, помещали в рабочее пространство нагревательной силитовой печи, оборудованной термопарой, где поддерживалась неизменной заданная температура, что позволило осуществить изотермическую сушку брикетов.

Фиксировали продолжительность процесса сушки сырых брикетов, считая окончанием процесса момент, когда потеря массы, в виде испаряющейся влаги, прекращалась.

Прочность брикетов после сушки оценивали, определяя сопротивление сжатию, применяя для этого разрывную машину МР-500. Показатель прочности высушенных брикетов получали как среднее арифметическое по результатам испытаний всех 5 испытуемых единиц. Полученные таким способом данные были использованы для создания математических моделей.

Результаты исследования. Для полиномиального описания влияния добавок твердого топлива, бентонита и температуры сушки на кинетику процесса (длительность сушки) и качество высушенных брикетов, воспользовались методом центрального композиционного ортогонального планирования второго порядка для трехфакторного эксперимента (план Бокса-Бенкина) [6], приняв следующую нумерацию факторов: содержание твердого топлива – X1; температура сушки – X2; содержание бентонита – X3. Интервалы варьирования и величины уровней факторов, выбранные надлежащим образом для приведения к условиям стандартной матрицы, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Натуральные значения факторов для уровней

Уровень	X ₁ , %	X ₂ , °C	X ₃ , %
верхний	0,9	600	1,5
нулевой	0,6	400	1,0
нижний	0,3	200	0,5
Интервал варьирования	0,3	200	0,5

Запланированные тринадцать опытов реализовали, обеспечив рандомизацию. Дважды провели опыты, в которых значения параметров оптимизации имели максимальное, минимальное и среднее значения.

В таблице 3 представлены матрица экспериментов, натуральные значения факторов, опытные и расчетные значения параметров оптимизации.

Коэффициенты регрессии полинома и их ошибки рассчитали после реализации плана по стандартным формулам [6,7], и подставили в полином общего вида:

$$Y = B_0 + \sum_1^k B_i x_i + \sum_1^k B_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^k B_{ij} x_i x_j + \dots \quad (1)$$

Полученные математические модели выглядят следующим образом:

- зависимость продолжительности сушки от содержания топлива, бентонита и температуры сушки:

$$\tau = 535 - 1,625 x_1 - 457,25x_2 + 60,125x_3 - 1,25x_1x_2 + 0,50x_1x_3 - 23,25x_2x_3 - 2,5 x_{12} + 261,25x_{22} - 5,5x_{32} ;$$

- зависимость прочности высушенных брикетов от содержания топлива, бентонита и температуры сушки:

$$\Pi = 22 - 2,925 x_1 + 13,4125x_2 + 0,0625x_3 + 0,525x_1x_2 + 0,725x_1x_3 - 0,05x_2x_3 + 2,2x_1^2 + 0,475x_2^2 - 5,125x_3^2.$$

Проверили адекватность математических моделей реальному процессу с помощью критерия Фишера. Для чего рассчитали по полученным полиномам параметры оптимизации (продолжительность сушки и прочность высушенных брикетов), см.табл.3. Используя полученные расчетные значения параметров оптимизации, нашли дисперсии адекватности (S_{ад}) и опыта (S_{оп}), и вычислили критерии Фишера по формуле:

$$F_{\text{расч.}} = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_{\text{оп}}^2} \quad (2)$$

Критерий Фишера для полинома зависимости продолжительности сушки от содержания топлива, бентонита и температуры сушки:

$$F_{\text{расч.}} = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_{\text{оп}}^2} = 289,1389/593 = 0,4879 < 3,9 = F_{\text{табл.}}^{0.05}$$

Критерий Фишера для полинома зависимости прочности высушенных брикетов от содержания топлива, бентонита и температуры сушки:

$$F_{\text{расч.}} = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_{\text{оп}}^2} = 2,1306 / 1,34 = 1,59 < 3,9 = F_{\text{табл.}}^{0.05}$$

Поскольку расчетные значения критериев Фишера меньше табличных для соответствующего уровня значимости и степеней свободы [7], то адекватность моделей обоснована и, значит, полученные полиномы достаточно точно описывают процессы изменения длительности сушки и прочности сухих окатышей под влиянием выбранных факторов.

Графические отображения полученных зависимостей представлены на рис. 1, 2.

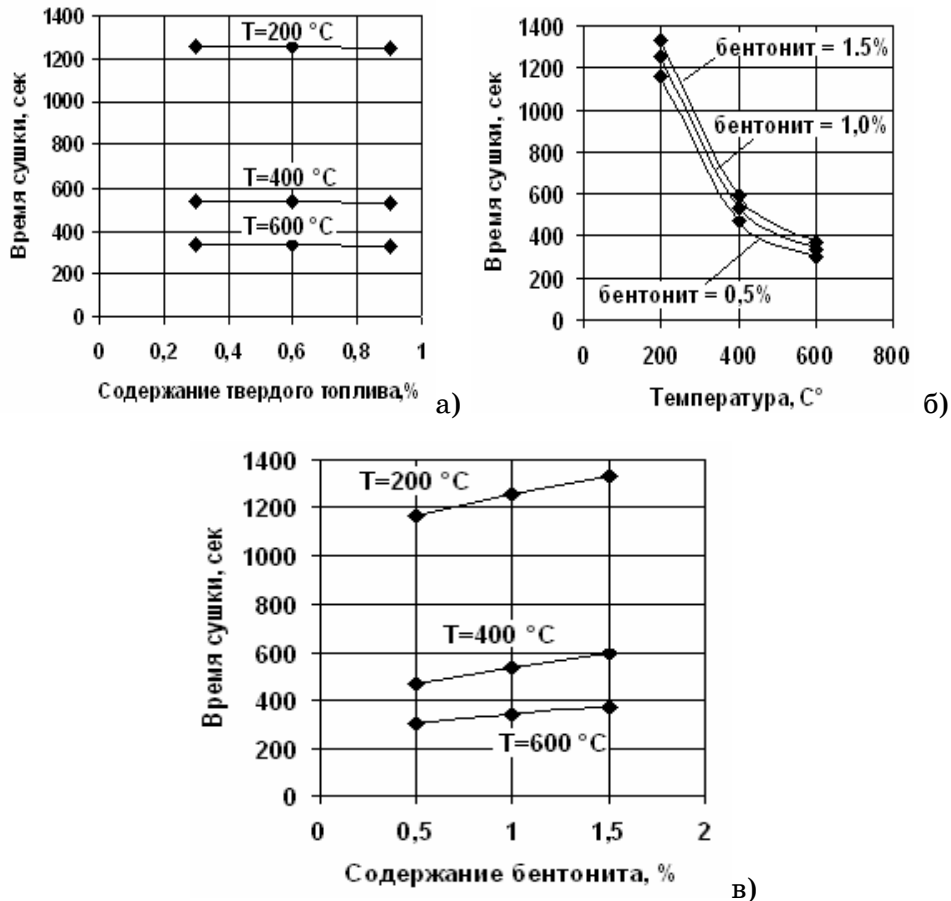


Рисунок 1 – Зависимости времени сушки от: а) – содержания твердого топлива при температурах 200°С, 400°С и 600°С; б) – температур сушки при содержаниях бентонита 0,5%, 1,0% и 1,5%; в) – содержания бентонита при температурах 200°С, 400°С и 600°С

Анализ графика, изображенного на рис.1а), свидетельствует о том, что изменение количества твердого топлива в составе железорудных окатышей существенно не влияет на длительность процесса их сушки.

Так, при увеличении содержания коксика с 0,3 % до 0,9 %, т.е. в три раза, продолжительность сушки при $T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ изменилась лишь на 3,25 с (с 534,125 с до 530,875 с). Вероятно, наблюдаемый характер зависимости объясняется гидрофобной природой поверхности кокса (краевой угол смачивания которого значительно превышает 90°), что подтверждается, в частности, характером кривых смачивания кокса [8], которые, свидетельствуют о почти полном отсутствии смачивания его технической водой, отмечая, вместе с тем, высокие показатели смачивания кокса керосином, а еще большие – бензолом (около 52 мм и 97 мм, соответственно, за 8 минут, против 2,5-3 мм для воды за тот же время). Итак, благодаря особенностям своей природы, кокс никоим образом не может удерживать воду, и препятствовать процессу ее удаления, а единственная форма влаги, присущая ему - это гигроскопическая вода, которая фактически является свободной и испаряется достаточно легко и быстро, не влияя на общую продолжительность процесса сушки.

Таблица 3

Трёхфакторный план проведения эксперимента Бокса – Бенкина (В-В3), натуральные значения избранных факторов и значения параметров оптимизации

Номер опыта	Значение фактора						Время сушки, сек.				Прочность на сжатие, кгс / бр.			
	кодированное			натуральное			Серия опытов		среднее	расчетное	Серия опытов		среднее	расчетное
	x ₁	x ₂	x ₃	x ₁	x ₂	x ₃	I	II			I	II		
1	+	+	0	0,9	600	1	325	-	325	333,625	38,4	-	38,4	35,6875
2	+	-	0	0,9	200	1	1260	-	1260	1250,625	5	-	5	7,8125
3	-	+	0	0,3	600	1	320	340	330	339,375	42,6	44	43,3	40,4875
4	-	-	0	0,3	200	1	1260	-	1260	1251,375	12	-	12	14,7125
5	+	0	+	0,9	400	1,5	570	-	570	586	15	-	15	16,9375
6	+	0	-	0,9	400	0,5	480	-	480	464,75	17,4	-	17,4	15,3625
7	-	0	+	0,3	400	1,5	560	585	573	588,25	20	18,5	19,3	21,3375
8	-	0	-	0,3	400	0,5	485	-	485	469	24,6	-	24,6	22,6625
9	0	+	+	0,6	600	1,5	395	-	395	370,375	30	-	30	30,775
10	0	+	-	0,6	600	0,5	290	-	290	296,625	26	-	26	30,75
11	0	-	+	0,6	200	1,5	1320	1355	1338	1331,375	8,8	-	8,8	4,05
12	0	-	-	0,6	200	0,5	1140	-	1140	1164,625	4	5,2	4,6	3,825
13	0	0	0	0,6	400	1	535	-	535	535	22	-	22	22

Повышение температуры сушки приводит к значительному сокращению времени сушки железорудных окатышей, что наглядно демонстрирует рис.1б). С позиций молекулярно-кинетической теории строения вещества [9], это явление объясняется следующим образом: повышение температуры является непосредственной причиной увеличения кинетической энергии движения молекул воды, и когда величина этой энергии превышает величину работы, необходимой для преодоления противодействия молекулярных сил в слое, толщиной равном радиусу молекулы (так называемый радиус молекулярного взаимодействия) над поверхностью воды, происходит испарение; когда же температуры превышают 100 °С, испарение воды значительно интенсифицируется, благодаря тому, что расстояние между молекулами и их кинетическая энергия возрастают, а, значит, во-первых: силы межмолекулярного взаимодействия слабеют, а во-вторых: всё меньше энергии необходимо добавить, чтобы молекулы могли покидать пределы жидкости. Такое состояние вещей имеет место до температуры 374°С, которую ещё называют критической, так как при температурах выше её, удельная теплота парообразования воды равна нулю, то есть в таких условиях «обычная», свободная вода может находиться только в газообразном состоянии; именно поэтому на графике рис. 1б) сокращение длительности сушки, при температурах от 200 °С до 400 °С такое стремительное (с 1253,5 с до 535 с (при содержании бентонита 1,0%)), значительно замедляется в диапазоне от 400 °С до 600 °С (с 535 сек. до 339 с (при содержании бентонита 1,0%)), когда свободная влага удаляется фактически мгновенно, а остающаяся влага является связанной (вода из капилляров диаметром меньше 10^{-5} мм и адсорбционная вода [10]) и, естественно, не так чувствительно реагирует на повышение температуры, т.к. энергия её связи сильно тормозит темп ускорения процесса испарения.

Зависимость, изображенная на рис. 1в), свидетельствует о существенном увеличении времени сушки окатышей с повышением содержания бентонита в их составе. Приведенная закономерность объясняется следующим образом. Основным составляющим бентонитовых глин является минерал монтмориллонит [11], специфичность кристаллической решетки которого обуславливает способность бентонита диспергировать и набухать, впитывая иногда более чем десятикратные количества воды [12]. Набухание монтмориллонита носит преимущественно внутрикристаллический характер, и влага, в виде прослоек между высокодисперсными частицами глины, образующими пространственную

сетку, удерживается молекулярными (ван-дер-ваальсовыми) силами притяжения, т.е. является адсорбционно связанной влагой [13]. Энергия связи адсорбционной влаги ($3,47 \cdot 10^{10}$ эрг/моль) значительно превышает энергию связи капиллярной влаги (от $5,3 \cdot 10^3$ до $5,3 \cdot 10^8$) [14], поэтому естественно, что увеличение содержания адсорбционно связанной воды затрудняет процесс влагоудаления и снижает скорость сушки брикетов.

Увеличение содержания твердого топлива в составе железорудных окатышей отрицательно влияет на прочность последних в сухом состоянии (см. рис. 2а). Так, постепенное повышение количества кокса в испытанных образцах с 0,3% и 0,6% до 0,9%, привело к следующему падению прочности на сжатие высушенных брикетов: 27,125 кгс/бр., 22 кгс/бр. и 21,275 кгс/бр., соответственно (при температуре сушки 400 °С). Можно предположить, что такой характер зависимости обусловлен действием двух факторов. Во-первых, как уже упоминалось, кокс - это гидрофобный материал, водой не смачивается и не диспергирует, следовательно существенно снижает прочность сырых окатышей, так как в контакте с водой не образует сил ни коллоидного, ни молекулярного, ни капиллярного сцепления, которые фактически и являются связующими силами в сыром окатыше [8]; после удаления влаги в процессе сушки остаются силы коллоидного сцепления. Во-вторых, возможно отрицательным образом на прочность высушенных окатышей влияет выход летучих веществ кокса, который, существенно возрастает с увеличением массовой доли твердого топлива.

Анализ данных, приведенных на рис. 2б), показывает, что прочность высушенных окатышей повышается по мере роста температуры сушки, и составляет 9,0625 кгс/ок., 22 кгс/ок. и 35,8875 кгс/ок. для температур 200, 400 и 600 °С, соответственно (содержание твердого топлива – 0,6 %). Такая тенденция давно отмечалась в разнообразных научных исследованиях [15,16], и вероятно связана с протеканием определенных твердофазных реакций. Возможно окисление магнетита до гематита, которое начинается уже при температуре 300°С [16], положительно влияет на процессы, определяющие упрочнение окатышей.

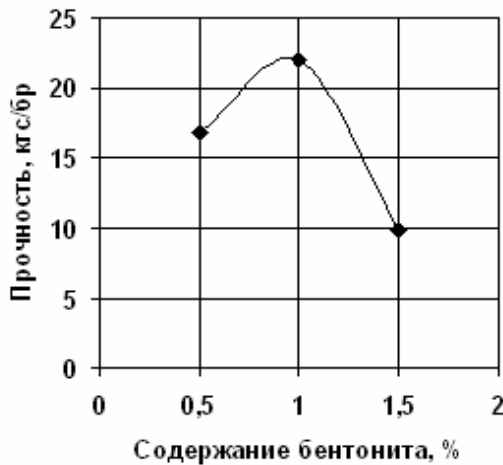
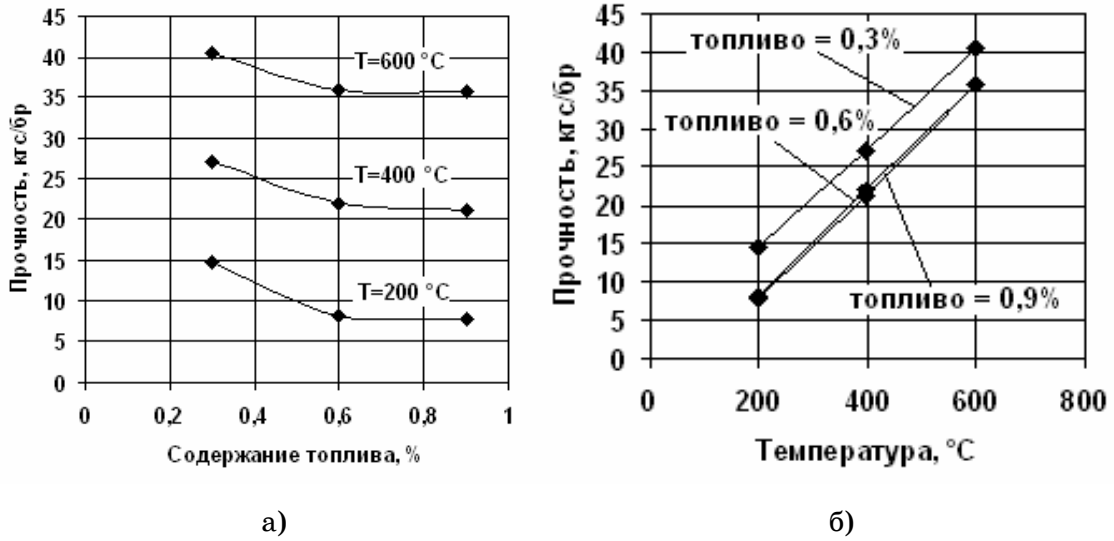


Рисунок 2 – Зависимости прочности окатышей от: а) – содержания топлива при температурах 200 °С, 400 °С и 600 °С; б) – температур сушки при содержании топлива 0,3 %, 0,6 % и 0,9 %; в) – содержания бентонита при температуре 400 °С и содержании твердого топлива 0,6 %

Достаточно сложно однозначно оценить влияние изменения количества бентонита на прочность высушенных окатышей. Анализируя рис. 2в), констатируем, что повышение содержания бентонита с 0,5 % до 1,0 % приводит к упрочнению брикетов с 16,8125 кгс/бр. до 22 кгс/бр, а дальнейший рост содержания бентонита до 1,5 % приводит к падению прочности сухих брикетов до уровня 9,8 кгс/бр ($T_{\text{сушки}}=400\text{ °C}$, $\text{сод. твердого топлива}=0,6\text{ \%}$). Определенный рост прочности сухих окатышей при повышении количества бентонита с 0,5 % до 1,0 % не является ошибкой данного исследования, он упоминался в работах [13,17] и объяснялся В.М. Витюгиным следующим образом: силы коллоидного сцепления, которые получают значительное развитие вследствие диспергирования бентонитовой

глины, растут по мере удаления влаги из окатышей при сушке; после полного ее удаления, наступает довольно крепкая связь, которая обеспечивает сцепление или склеивание частичек бентонита как между собой, так и с частичками шихтовых материалов в окатышах; значит рост прочности вызван численным увеличением «контактов склеивания» бентонита. Последующее падение прочности сухих окатышей при увеличении содержания бентонита с 1,0 % до 1,5 %, вероятнее всего вызвано нивелированием положительного влияния увеличения «контактов склеивания» частичек бентонита между собой и с шихтовыми материалами, такими отрицательными факторами, как влияние заземленного воздуха и усадка окатышей в ходе сушки [16]. Степень действия этих факторов неуклонно возрастает с повышением коллоидизации капиллярно-пористых тел, которыми, собственно, и являются железорудные окатыши.

Выводы. Выполнено экспериментальное исследование процесса сушки железорудных окатышей, содержащих твердое топливо. Составлены математические модели, описывающие зависимости продолжительности сушки и качества высушенных окатышей от содержания твердого топлива, бентонита и температуры сушки.

Анализ полученных математических моделей свидетельствует о том, что максимально благоприятными, с точки зрения сокращения продолжительности сушки и повышения прочности сухих окатышей, величинами исследуемых факторов являются:

- минимальное (0,5 %) содержание твердого топлива;
- максимальная (600 °С) температура сушки;
- 0,5-1,0 % ^{ное} содержание бентонита.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петров А.В., Бережной Н.Н., Воскерчан Н.В. Интенсификация процессов сушки и обжига окатышей. // Сталь – 1976 - № 6 – С. 491 – 494.
2. Ковалев Д.А., Ванюкова Н.Д., Журавлев Ф.М. и др. Использование опытных железорудных офлюсованных окатышей с остаточным углеродом в доменной плавке. // Сталь – 1999. – № 8. – С. 4 – 9.
3. Абзалов В.М., Клейн В.И., Леушин В.Н., Шаврин С.В. Газодинамика слоя сырых окатышей на обжиговой машине // Сталь – 2003 - №1- С.17-20.
4. Горбачёв В.А., Евстюгин С.Н., Мальцева В.Е., Усольцев Д.Ю. Изучение влияния свойств бентонитовых глин на формирование качества железорудных окатышей. // Сталь – 2003 - №1- С.15-16.
5. Мовчан В.П. Разработка режима термообработки рудоугольных офлюсованных окатышей // Металлургическая и горнорудная промышленность – 2002 - №2 – С.8-10.
6. Ковшов В.Н. Постановка инженерного эксперимента. – Киев – Донецк: Вища школа. Головное изд-во, 1982. – 120с.

7. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. - М.: Наука, 1976.-279с.
8. Коротич В.И. Основы теории и технологии подготовки сырья к доменной плавке. - М.: Металлургия, 1978.-208с.
9. Жданов Л.С. Учебник по физике для средних специальных учебных заведений. - М.:Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1975.- 592с.
- 10.Казанский М.Ф. Термограммы изотермической сушки и дифференциальная влажность побиянковского и пыжевского бентонитов // Бентонитовые глины Украины, сб.2.- Изд-во АН УССР, 1958. - С.76-85.
- 11.Коваленко Д.Н. Минералогический состав бентонитовых глин главных месторождений Украины // Бентонитовые глины Украины, сб.2. - Изд-во АН УССР, 1958. - С.23-42.
- 12.Ручкин И.Е. Производство железорудных окатышей. -М.: Металлургия, 1976. - 184с.
- 13.ВитюгинВ.М., ДокучаевП.Н.//Информация ин-та «Черметинформация» - 1968 - сер.3 - вып.10 – С.2-10.
- 14.Лыков А.В. Теория сушки. - М.: Энергия, 1968.- 472с.
- 15.Кузнецов Р.Ф., Майзель Г.М., Буткарев А.П. и др. // Бюл. ин-та «Черметинформация» - 1973 - №8 - С.20-22.
- 16.Юсфин Ю.С., Базилевич Т.М. Обжиг железорудных окатышей. - М.: Металлургия,1973. – 272 с.
- 17.Валавин В.С., Борисов.В.М. // Информация ин-та «Черметинформация» - 1968 - сер.3 - вып.10 - С.10-13.