

УДК 622.788

М.Н. Бойко, Д.А. Ковалев, Н.Д. Ванюкова

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСНОВНОСТИ, ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЖИГА, ГЛИНОЗЕМИСТОГО И МАГНЕЗИАЛЬНОГО ИНДЕКСОВ НА КАЧЕСТВО ОКАТЫШЕЙ

Постановка проблемы. При производстве окатышей большое внимание уделяется проблемам снижения расхода энергоресурсов и повышению качества конечного продукта. Создание исходных условий для получения в процессе обжига связки и рудной части благоприятного химического и минералогического состава может значительно улучшить качественные характеристики обожженных окатышей.

Для характеристики подготовленности шихты к процессам феррито- и силикатообразования, помимо основности, предложено использовать глиноземный Al_2O_3/SiO_2 и магнезиальный MgO/SiO_2 индексы в качестве оценочных характеристик реакционной способности шихты. [1]

Постановка задачи. Для практического применения предложенных индексов необходимо комплексное исследование влияния основности, глиноземистого и магнезиального индексов, а также температуры обжига на показатели качества окатышей, что и явилось предметом исследования настоящей работы.

Методика исследования. Поставленная задача решалась методом планирования эксперимента. Исследование выполнили в соответствии с ортогональным композиционным планом второго порядка для четырёх факторов [2].

В исследовании использовали шихтовые материалы, химический состав которых приведён в таблице 1.

В качестве факторов эксперимента были выбраны:

Основность (CaO/SiO_2) – X_1 ; глиноземистый индекс (отношение Al_2O_3/SiO_2) – X_2 ; магнезиальный индекс (отношение MgO/SiO_2) – X_3 ; температура обжига – X_4 . Интервал варьирования и величины уровней факторов приведены в таблице 2.

Все двадцать пять опытов были выполнены с обеспечением рандомизации. Опыты, в которых полученная прочность имеет максимальное, минимальное значение и для нулевой точки были повторены дважды.

Таблица 1

Химический состав компонентов шихты

Материал	Содержание, %						
	Fe _{об}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
Концентрат	65	26,49	66,28	5,05	0,2	0,08	0,3
Известняк	0,47	0	0,7	1,6	0,8	53,5	0,7
MgO (ч.д.а.)	0	0	0	0	0	0	100
Al ₂ O ₃ (ч.д.а.)	0	0	0	0	100	0	0
Бентонит	4,1	0	6,08	62,28	13,56	1,7	1,94

Таблица 2

Натуральные значения факторов для уровней

Номер фактора	Наименование фактора	Уровни факторов				
		-1,41	-1	0	1	1,41
1	Основность CaO/вЮг	0,318	0,4	0,6	0,8	0,882
2	Отношение Al ₂ O ₃ /8Ю ₂	0,118	0,2	0,4	0,6	0,682
3	Отношение МёО/8Ю ₂	0,1513	0,18	0,25	0,32	0,3487
4	Температура обжига, °С	1221,8	1230	1250	1270	1278,2

Получение брикетов. Компоненты шихты для конкретного опыта дозировались согласно рассчитанному составу шихт (таблица 3), исходя из общей массы шихты 0,2 кг на один опыт. Смешивание производили в ручном смесителе мешкового типа в течение 0,5 минут. После шихту выгружали в фарфоровую чашу, добавляли влагу (10 % от массы шихты) и повторно перемешивали в ватше в течении 2 минут.

При наборе шихты для каждого брикета использовали объёмное дозирование, которое позволяет получать брикеты в колебаниями по высоте $\Delta H \pm 1$ мм. Диаметр брикетов постоянный и равен 10 мм.

Брикетиrowание осуществляли на прессе РМ-1 с усилием 350 кг/брикет или 275 кг/см².

Обжиг брикетов. Полученные брикеты сушили в сушильном шкафу при температуре 115 °С в течение 2 часов.

Окатыши обжигали в вертикальной силитовой печи мощностью 6 КВт. Температуру внутри печи контролировали с помощью термопары PtRh10. Предварительно печь разогревали до требуемой температуры обжига согласно плану эксперимента (таблица 3). Сухие

брикеты в количестве 30 штук помещались в корзинку из нихромовой проволоки. Корзинка с пробой помещалась в печь с заданой температурой и выдерживалась в естественной атмосфере в течение 15 минут. Предварительно для определения влияния времени обжига на прочность окатышей продолжительность выдержки составляла 5, 10 и 15 минут.

Таблица 3

Расчетный состав шихт и прочность окатышей

Номер опыта	Содержание компонента, %					Прочность на сжатие, кг/ок
	Концентрат	Известняк	MgO	Al ₂ O ₃	Бентонит	
1	95,14	2,68	0,64	0,75	0,80	88,75
2	89,71	7,52	1,31	0,68	0,80	97,65
3	94,44	2,66	1,38	0,74	0,80	103,71
4	93,16	2,63	0,63	2,82	0,80	110,17
5	88,53	7,42	0,58	2,70	0,80	95,09
6	90,36	7,57	0,59	0,69	0,80	124,89
7	92,48	2,61	1,35	2,80	0,80	79,30
8	87,91	7,37	1,28	2,68	0,80	98,56
9	95,14	2,68	0,64	0,75	0,80	123,79
10	90,36	7,57	0,59	0,69	0,80	106,16
11	93,16	2,63	0,63	2,82	0,80	78,04
12	94,44	2,66	1,38	0,74	0,80	84,81
13	87,91	7,37	1,28	2,68	0,80	89,03
14	92,48	2,61	1,35	2,80	0,80	103,35
15	89,71	7,52	1,31	0,68	0,80	106,07
16	88,53	7,42	0,58	2,70	0,80	94,81
17	94,79	1,61	1,01	1,81	0,80	83,94
18	88,20	8,42	0,93	1,68	0,80	110,25
19	92,77	5,18	0,98	0,29	0,80	118,76
20	90,10	5,03	0,96	3,16	0,80	99,77
21	91,88	5,13	0,46	1,75	0,80	96,15
22	90,95	5,07	1,47	1,73	0,80	67,39
22*	90,95	5,07	1,47	1,73	0,80	71,25
23	91,41	5,10	0,97	1,74	0,80	68,59
23*	91,41	5,10	0,97	1,74	0,80	64,5
24	91,41	5,10	0,97	1,74	0,80	150,88
25	91,41	5,10	0,97	1,74	0,80	117,81
25*	91,41	5,10	0,97	1,74	0,80	123,45
24,5	91,41	5,10	0,97	1,74	0,80	86,23
24,10	91,41	5,10	0,97	1,74	0,80	114,18
24,15*	91,41	5,10	0,97	1,74	0,80	143,78

* - повторные опыты, 24,5; 24,10; 24,15 время обжига 5, 10, 15 мин соответственно

После обжига корзинка извлекалась из печи и брикеты охлаждались на воздухе до температуры менее 80 °С.

Определения прочности брикетов. Прочность брикетов после обжига определяли с помощью прессы РМ-1.

Пересчёт прочности на сжатие брикет-окатыш. Для оценки прочности окатышей на основе определенной прочности брикетов был проведен следующий эксперимент.

Брикеты диаметром 10 мм, изготовленные из шихт, которые использовались в основном эксперименте, подвергались обжигу по принятой методике при температурах 1220-1280 °С. Для сравнения при тех же условиях обжигались окатыши диаметром 10-12 мм, полученные на тарельчатом окомкователе диаметром 1 м. Из обожженных брикетов вырезали окатыши (шарики) диаметром 10 мм. Результаты сравнения прочности на сжатие брикетов в вертикальном (площадь основания брикетов диаметром 10 мм составляет см²) и горизонтальном (по образующей цилиндра) положениях, полученных шариков и окатышей приведены в таблице 4.

Графически результаты сравнения и уравнения для пересчетов прочности брикетов (в вертикальном и горизонтальном положениях) на прочность окатышей диаметром 10 мм приведены на рисунке 1.

Таблица 4

Сравнение прочности брикетов и окатышей

№п.п.	Прочность на сжатие брикетов и окатышей, кг/бр (ок)			
	Брикеты, диаметр 10 мм			Окатыши, диаметр 10-12 мм
	Вертикально	Горизонтально	Шарик (выточен)	
1	379	92	62	43
2	455	97	91	61
3	477	119	96	66
4	-	165	124	123
5	-	341	268	142
Пересчет на кг/см ² *	556,4			

Таким образом экспериментально обоснована методика пересчета прочности брикетов (кг/бр) на прочность окатышей (кг/ок).

Результаты исследования. Результаты измерения прочности обожженных брикетов и рассчитанной прочности окатышей показаны в таблице 3. Зависимость прочности окатышей от времени обжига при температуре 1280 °С графически представлена на рисунке 2.

На основе экспериментальных результатов, полученных в соответствии с планом экспериментов, была разработана математическая модель для расчета прочности на сжатие окатышей.

Коэффициент корреляции факторов относительно выходной характеристики (прочность окатышей на сжатие) составил 0,9.

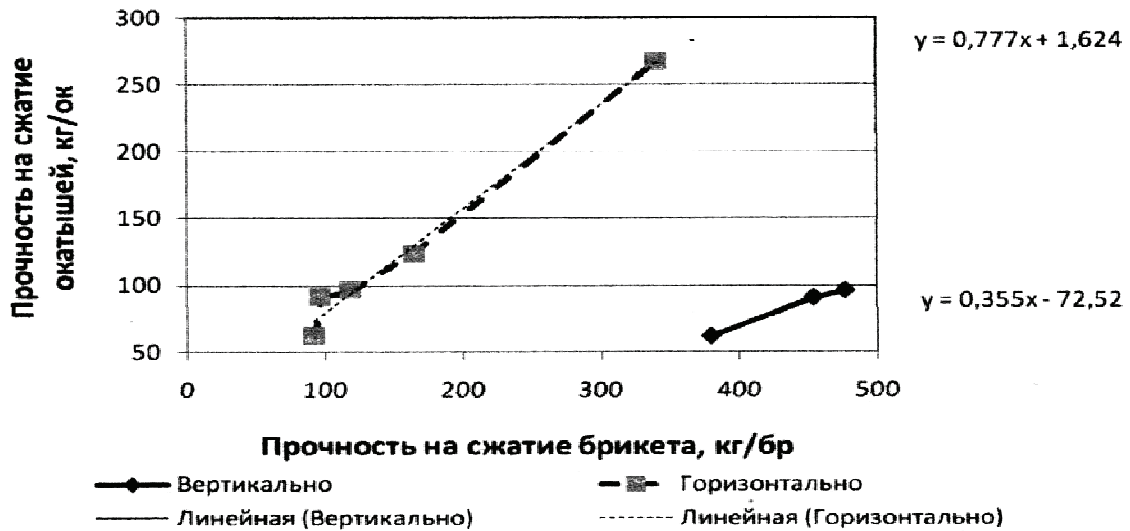


Рисунок 1 - Сравнение прочности на сжатие брикетов и окатышей
Получены следующие коэффициенты полинома:

1. Коэффициенты регрессии полинома:

$$b_1 = 4,301684, b_2 = -6,34702, b_3 = -5,54278, b_4 = 14,5853.$$

2. Эффекты взаимодействия факторов:

$$b_{12} = -1,69173, b_{13} = -0,00343, b_{14} = -4,60653, b_{23} = 2,71758, \\ b_{24} = -0,97864, b_{34} = -1,54501.$$

3. Коэффициенты регрессии при квадратичных факторах:

$$b_{11} = -6,45534, b_{22} = 5,811341, b_{33} = -21,9015, b_{44} = 6,285032.$$

4. Свободный член полинома:

$$b_0 = 99,90854.$$

После записи рассчитанных коэффициентов в отрезок ряда Тейлора, получили полином, отражающий зависимость прочности окатышей на раздавливание в модели от перечисленных выше факторов:

$$P = 99,90854 + 4,301684 \cdot X_1 - 6,34702 \cdot X_2 - 5,54278 \cdot X_3 + 14,5853 \cdot X_4 - \\ 1,69173 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,00343 \cdot X_1 \cdot X_3 - 4,60653 \cdot X_1 \cdot X_4 + 2,71758 \cdot X_2 \cdot X_3 - \\ 0,97864 \cdot X_2 \cdot X_4 - 1,54501 \cdot X_3 \cdot X_4 - 6,45534 \cdot X_1^2 + 5,811341 \cdot X_2^2 - \\ -21,9015 \cdot X_3^2 + 6,285032 \cdot X_4^2$$

Чтобы отделить значимые члены полинома от незначимых, подсчитали дисперсию эксперимента по повторным опытам: $S_{оп}^2 = 867,6$.

Проверили воспроизводимость процесса по критерию Кохрена, выборке $k = 4$ и степени свободы $3G_{рас} = 0,59 < G_{таб}^{0,05} = 0,9065$

Воспроизводимость достаточна.

Проверили адекватность математической модели реальному процессу. Для этого рассчитали по полученному полиному параметры оптимизации для условий опыта. Дисперсия адекватности: $S_{ад}^2 = 367,87$.

Критерий Фишера: $F_{рас} = 0,424 < F_{таб}^{0,05} = 5,8$.

Следовательно, модель адекватна, т. е. полином достаточно точно описывает процесс изменения прочности окатышей под влиянием различных факторов.

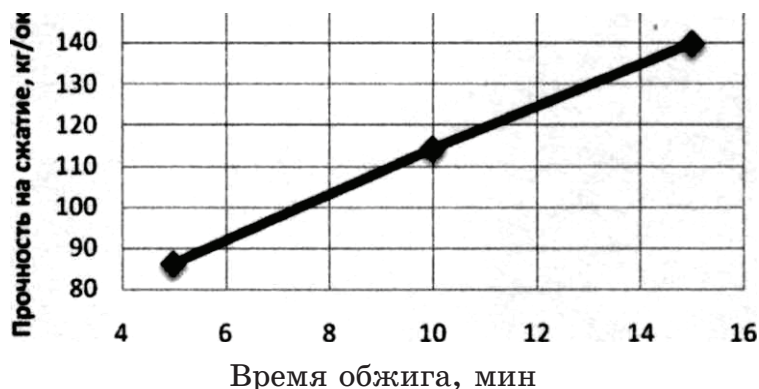


Рисунок 2 - Зависимость прочности окатышей от времени обжига

На рисунках 3,4,5 показаны рассчитанные по модели зависимости прочности окатышей на сжатие от основности, отношения Al_2O_3/SiO_2 , отношения MgO/SiO_2 при различных температурах.

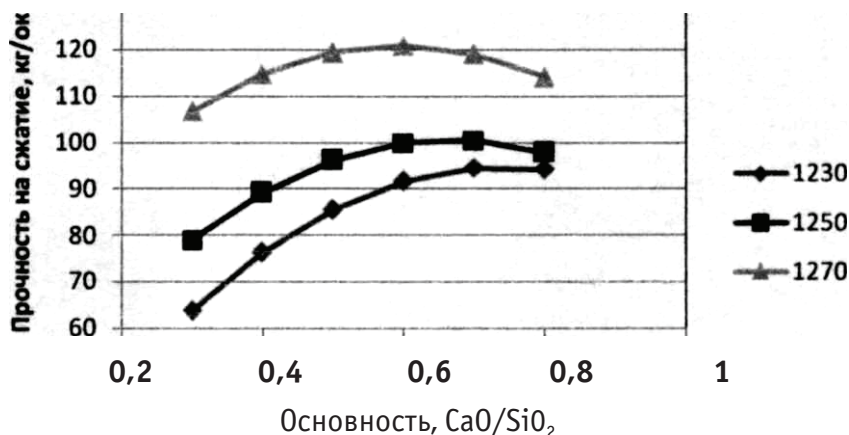


Рисунок 3 - Зависимость прочности окатышей от основности CaO/SiO_2 при различных температурах (модель)

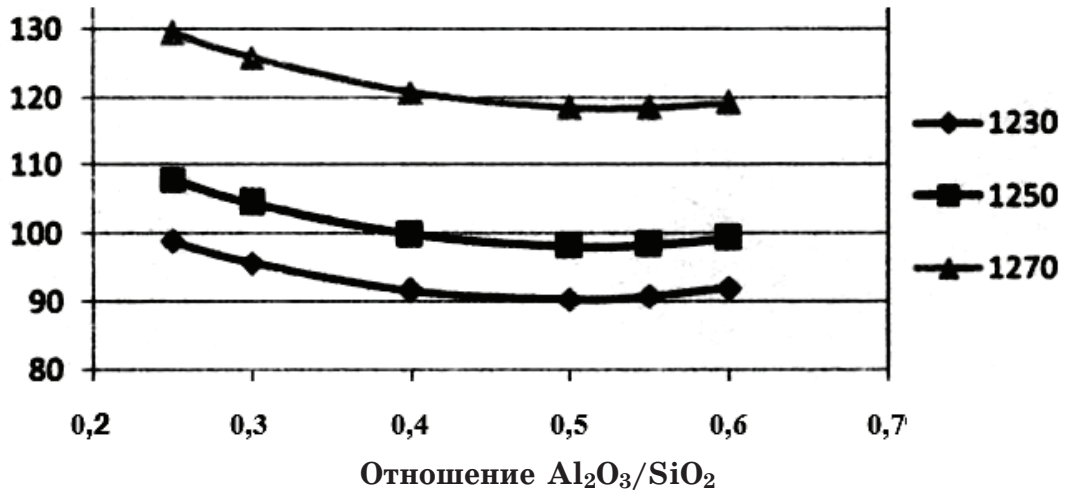


Рисунок 4 - Зависимость прочности окатышей от отношения Al_2O_3/SiO_2 при различных температурах (модель)

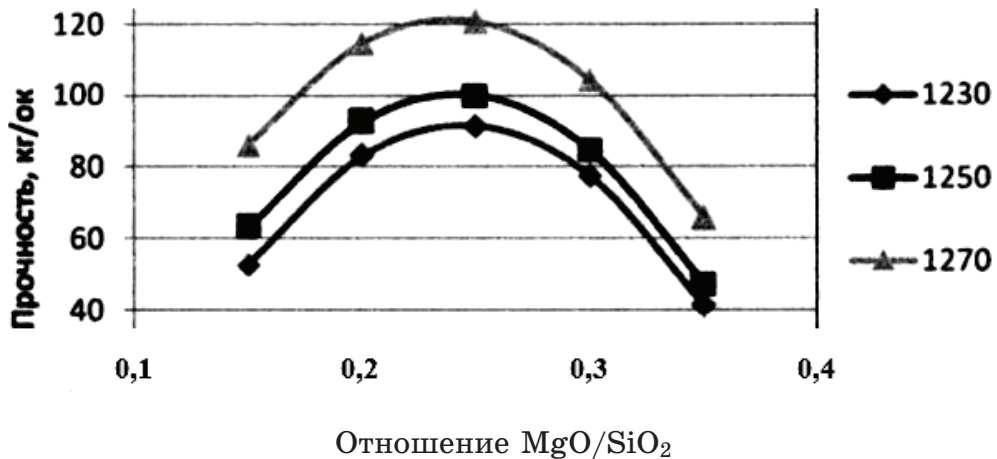


Рисунок 5 - Зависимость прочности окатышей от отношения MgO/SiO_2 при различных температурах (модель)

На рисунке 6 показаны полученные на основе опытных данных зависимости прочности окатышей от температуры обжига, основности, отношения Al_2O_3/SiO_2 , отношения MgO/SiO_2 при различных температурах.

Окатыши, как продукт высокотемпературной обработки, можно представить состоящим из трёх элементов структуры: кристаллической рудной части, шлакообразующей связки и порового пространства. При этом рудная составляющая (оксиды железа) определяют его горячую прочность, а связка в зависимости от основности, вместе с порами - холодную прочность. Обычно химический состав офлюсованных окатышей включает следующие оксиды: Fe_2O_3 , FeO , CaO , SiO_2 , MgO и Al_2O_3 , из которых, однако, только четыре первых являются минералообразующими, оксиды же магния и алюминия,

влияющие главным образом на морфологию фаз, следует рассматривать как дополнительные или структурообразующие [3,4]. Прочностные и другие характеристики окатышей как в горячем, так и в холодном состояниях могут быть существенно улучшены путём воздействия на химический состав связки и рудной части за счет добавок оксидов магния и алюминия. Оксид магния распределяется между рудными, ферритными и силикатными минералами, влияя на их морфологию, стабильность в холодном и горячем состояниях [5].

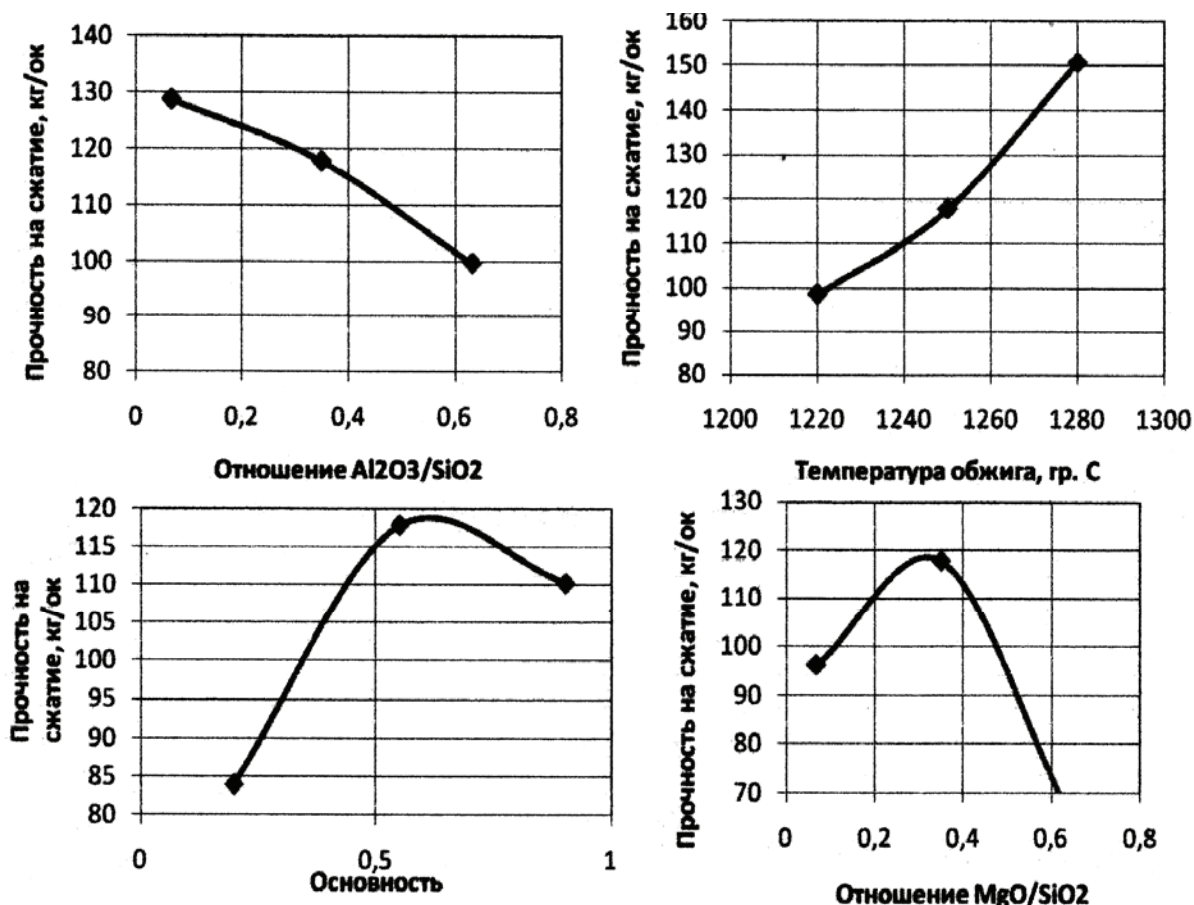


Рисунок 6 - Зависимость прочности окатышей от исследуемых параметров (эксперимент)

При пониженном содержании FeO в окатышах Al_2O_3 переходит в фазы связки, а MgO - сосредотачивается в рудной части. MgO является добавкой - кристаллизатором, так как в объёме расплава при охлаждении формирует центры кристаллизации. С уменьшением крупности частиц прочность окатышей возрастает и при этом снижается окисленность окатышей [6].

Изложенное является основанием для ввода дополнительных показателей, включающих соотношение структурообразующих

оксидов MgO и Al_2O_3 и оксидов, являющихся основой химического состава. На рисунках 4, 5 и 6 показано действие корректирующих модулей на уровень прочностных характеристик окатышей, рассчитанных по модели и установленных экспериментально. Из приведенных данных следует, что при добавках MgO наблюдается экстремальная зависимость с максимумом при отношении MgO/SiO_2 равном 0,22-0,25, в то время как влияние Al_2O_3/SiO_2 на прочность в холодном состоянии противоположно.

Очевидно, что с увеличением содержания SiO_2 в концентрате количество добавки MgO необходимо повышать (рис. 7), а роль Al_2O_3 будет снижаться.

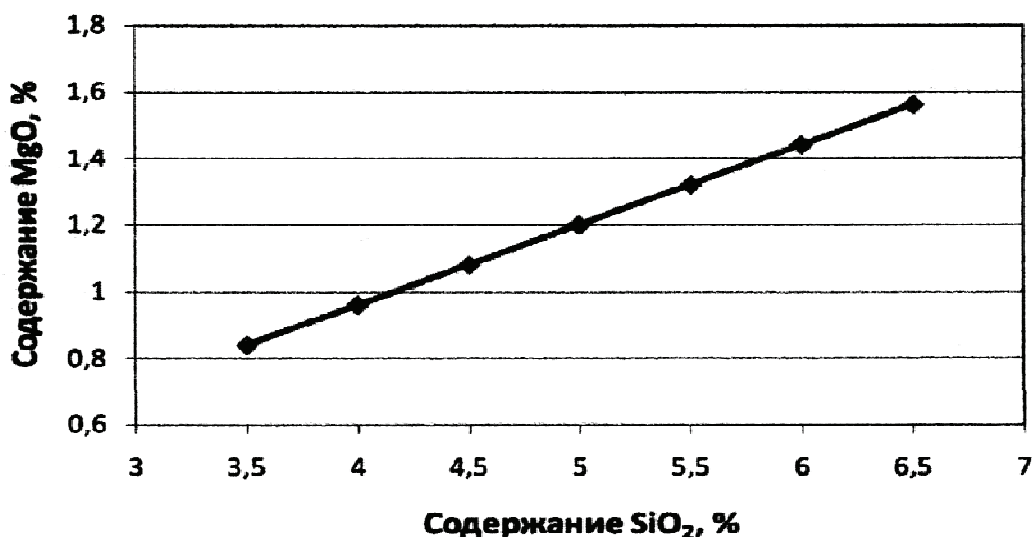


Рисунок 7 - Изменение количества добавки MgO в зависимости от содержания SiO_2

Выводы. На основании экспериментальных данных разработана математическая модель для расчёта прочности окатышей на раздавливание при изменении основности CaO/SiO_2 , глиноземистого Al_2O_3/SiO_2 и магнезиального MgO/SiO_2 индексов, а также температуры обжига.

Анализ процесса с использованием математической модели показал, что максимальная прочность окатышей достигается при магнезиальном индексе равном 0,23-0,28 и основности 0,55-0,65.

Увеличение температуры обжига с 1230 до 1280 °C способствует повышению прочности при основности до 0,8 и магнезиальном индексе до 0,35. При этом изменение глиноземистого индекса с 0,25

до 0,4 снижает прочность окатышей, с 0,4 до 0,55 - не изменяет, а дальнейшее увеличение индекса до 0,6 повышает прочность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Модель М.С., Лядова В.Я., Чугунова М.В. // Феритообразование в железорудном сырье.- М.: Наука.- 1990.- 152 С.
2. Ковшов В.Н. //Постановка инженерного эксперимента.- Киев.- Донецк. - Вища школа.- Головне изд-во.- 1982.- 120 С.
3. Синтез и свойства тройного алюмоферрита кальция - основной ферритной фазы офлюсованного железорудного сырья. / Т.Я. Малышева, И.В. Островская, В.Я. Лядова и др. // Известия АН СССР. - Металлы. -1976. - № 6 - С. 78 - 86.
4. Малышева Т.Я. // Петрография железорудного агломерата.-М.: Наука.- 1969 - 168 С.
5. Малышева Т.Я. // Железорудное сырьё: упрочнение при термообработке.- М.- Наука.- 1988.- 198 С.
6. Влияние магнезии на минеральный состав и структуру спека./ Г.С. Васильев, Р.А. Кравченко // Известия ВУЗов. Черная металлургия.- 1974.-М4.- С. 41-43.