

$$M_{\text{гр. вр}} = \frac{0,35 N_{\Sigma i} (1 - \eta_k)}{\omega_i \eta_k}.$$

Из графика суммарного момента на рис. 4 можно определить максимальную и минимальную мощность, необходимую компрессору, и подобрать необходимый по мощности, моменту и диапазону регулирования частоты электропривод.

Приведенные расчеты и графики получены для имитационной модели компрессора 302 ВП10/8 в среде MatLab.

Полученные результаты можно использовать для построения имитационной модели системы автоматического регулирования скорости обобщенного углового поршневого компрессора.

Выводы

Предложен алгоритм расчета параметров и характеристик углового поршневого компрессора, учитывающий характер движения кривошипно-шатунного механизмов первой и второй ступеней сжатия как специфической пульсирующей нагрузки для регулируемого электропривода.

Методика выбора мощности элементов силовой цепи компрессора с учетом изменения его производительности по расчетной упорядоченной нагрузочной диаграмме позволяет снизить излишний запас по мощности электропривода, который имел место при выборе мощности по усредненной диаграмме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черкасский В.М. Насосы, вентиляторы, компрессоры. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 416 с.
2. Фотин Б.С., Пирумов И.Б., Прилуцкий И.К., Пластинин П.И. Поршневые компрессоры / под общ. ред. Б.С. Фотина. — Л.: Машиностроение, 1987. — 372 с.
3. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу аппаратов химической технологии / под ред. чл.-корр. АН СССР П. Г. Романкова. 10-е изд., перераб. и доп. — Л.: Химия, 1987. — 576 с.
4. Воронцовский А.В. Современные компрессорные станции (концепции, проекты, оборудование). — М.: ООО «Премиум Инжиниринг», 2008. — 614 с.
5. Филипас А.А., Кладиев С.Н., Челядинов Р.Л. Уточненный расчет нагрузочных характеристик электропривода оппозитного поршневого компрессора // Известия вузов. Электромеханика. — 2011. — № 4. — С. 67–71.

Поступила 06.06.2012 г.

УДК 669.337

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗУЧЕНИЯ СУШКИ ГРАНУЛИРОВАННОГО ЧЕРНОВОГО МЕДНО-МОЛИБДЕНОВОГО КОНЦЕНТРАТА МЕСТОРОЖДЕНИЯ «ТАСТАУ»

Л.М. Каримова, Е.Т. Кайраларов, К.Ж. Жумашев, Т.Е. Токбулатов

Химико-металлургический институт, ТОО «Инновация», г. Караганда, Республика Казахстан
E-mail: lutsia.08@mail.ru

Приведены результаты исследования операции сушки, входящей в технологическую схему, которая включает гранулирование черного медно-молибденового концентрата месторождения «Тастау». Получены математические модели, описывающие закономерности обезвоживания и изменение свойств материала в ходе термической обработки. Контролируемыми показателями являлись относительная убыль массы при сушке, при последующем досушивании гранул, степень их обезвоживания. Установлено, что особенности фазового состава влияют на результаты их последующей обработки. Специфика рассматриваемого материала определяет также и выбор комбинаций обжига и выщелачивания, при использовании которых стало возможным достижение заданной цели — наиболее полного извлечения меди и молибдена.

Ключевые слова:

Сушка, гранулирование, черновой флотоконцентрат, факторы, обобщенные функции.

Key words:

Drying, granulation, rough flotation concentrate, factors, generalized functions.

Черновой медно-молибденовый концентрат может служить источником извлечения ценных компонентов в раствор. В одном из предлагаемых вариантов ведения процесса, включающего обжиг [1], в качестве подготовительных операций в технологической схеме использованы гранулирование концентрата и сушка полученных гранул [2].

Концентрат характеризуется высокой степенью дисперсности. Поэтому необходимо получить на стадии окатывания такие гранул, которые соответствуют по свойствам основному условию — достижению при обжиге высокого извлечения ценных компонентов. Назначение последних — стабилизация процесса окатывания с образованием гра-

нул, имеющих разветвленную сеть микрокапилляров, для облегчения диффузии кислорода внутрь этих гранул и обратной диффузии продуктов обжига. В упомянутых работах [1, 2] эти вопросы рассматриваются лишь отрывочно.

Задачей исследования было восполнение указанных «пробелов» на основе использования современных представлений об анализе многофакторных процессов с получением обобщенных математических моделей сушки гранулированных материалов.

Целью наших исследований явилось изучение режима обезвоживания с максимально полным удалением не только физической, но и конституционной влаги окатышей из чернового медно-молибденового концентрата.

Исследованию подвергались гранулы, полученные из чернового концентрата с содержанием класса $-0,074$ мм 75 %, насыпная масса концентрата составила $1,12$ г/см³. Химический состав приведен в табл. 1.

Таблица 1. Содержание основных компонентов в концентрате, мас. %

Cu	S	Fe	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Mo
7,91	9,51	15,15	12,58	0,82	2,07	28,76	7,90	0,13

Концентрат окатывали на лабораторном грануляторе с диаметром чаши 0,4 м, высотой борта 0,15 м при скорости вращения 20 об/мин и подаче связующего разбрызгиванием. Концентрация лигносульфоната $1,05$ г/см³ в два раза меньше, чем используется на практике медеплавильных заводов.

Для определения оптимальных условий сушки гранул были проведены опыты на основе математического планирования эксперимента по методу [3]. Изучали влияние температуры (t , °C), продолжительности сушки (τ , мин), расхода воздуха (V , см³/с), размера гранул (d , мм). Условия и результаты опытов приведены в табл. 2.

При изучении сушки применяли специально предназначенную для этой цели установку, включающую электрокалорифер, компрессор, ротаметр и рабочую ячейку с решетчатым дном, а также термомпары и вторичные приборы. В ячейку помещали навеску влажных гранул. Снизу в ячейку вдували нагретый воздух с заданной линейной скоростью. По окончании опыта гранулы извлекали из ячейки, взвешивали, досушивали при температуре 105 °C и вновь взвешивали.

Особенность данного процесса обусловлена спецификой химического и фазового составов концентрата, содержащих сульфиды, сульфаты и оксиды металлов. При орошении концентрата водой на стадии гранулирования образуются гидратированные молекулы сульфидов и сульфатов металлов. Таким образом, гранулы, полученные из исследуемых концентратов, содержат и влагу, которая находится в капиллярах, образованных частицами пыли внутри гранул (несвязанную воду), и

химически связанную (конституционную) воду. Причем эти две характеристики сопоставимы друг с другом по величине.

Соединения металлов, содержащие в своем составе воду, дегидратируют в широком диапазоне температур, в том числе и при температуре ниже 105 °C. Например, $ZnSO_4 \cdot 6H_2O$ теряет пять молекул воды при 70 °C. Поэтому величины предельной относительной убыли массы влажных гранул, определяемые при той или иной температуре, не являются влажностью в общепринятом смысле этого слова. Как правило, содержание химически связанной воды не учитывается в практике сушки при нахождении влажности исследуемого образца. В то же время наличие значительных количеств химически связанной воды может привести к разрушению гранул в процессе их последующего обжига. Гранулы, попадая в зону повышенных температур, будут «взрываться» за счет интенсивного выделения воды разлагающихся кристаллогидратов.

При исследовании опытов определяли:

- а) количество воды (относительная убыль массы влажных гранул), перешедшей в газ в условиях опытов (W_1):

$$W_1 = \frac{(m_1 - m_2) \cdot 100 \%}{m_1},$$

где m_1 и m_2 — масса исходных влажных и подсушенных в опыте гранул;

- б) количество воды, удаляемое в ходе досушивания гранул при 105 °C (W_2):

$$W_2 = \frac{(m_2 - m_3) \cdot 100 \%}{m_1},$$

где m_3 — масса удаленной воды при досушивании;

- в) суммарное количество воды, перешедшее в газовую фазу на обеих стадиях (W_3):

$$W_3 = \frac{(m_1 - m_3) \cdot 100 \%}{m_1}. \quad (1)$$

При этом $W_3 = W_1 + W_2$, %.

Степень обезвоживания гранул (α) рассчитывали по соотношению [4]:

$$\alpha = \frac{(m_1 - m_2) \cdot 100 \%}{m_1 - m_3'} = \frac{W_1 \cdot 100 \%}{W_{3\max}},$$

где $W_{3\max}$ — предельное количество воды, которое может быть удалено в процессе термообработки материала при 210 °C; m_3' — масса удаленной воды при этой температуре.

Получены частные зависимости относительной убыли массы гранул после сушки W_1 и после их досушивания при 105 °C W_2 и степени обезвоживания гранул α от заданных факторов (рис. 1, 2). Адекватность полученных зависимостей определяли по коэффициенту корреляции R и его значимости t_R (точки — экспериментальные данные, линии — по уравнениям табл. 3, 4).

Как следует из этих зависимостей, на W_1 влияют температура и время термообработки. При варь-

ровании скорости воздуха в принятом интервале убыль массы гранул остается неизменной, что указывает на кинетический режим процесса сушки.

Таблица 2. Зависимость экспериментальных (α) и рассчитанных (ρ) по обобщенному уравнению значений изучаемых функций (W , α) от температуры сушки t , °C; продолжительности τ , мин; размера гранул d , мм; расхода вдуваемого воздуха V , см³/с

Изучаемый фактор	W_1 , %	$W_1(4)$, %	W_3 , %	α_3 , %	α , (5), %
t , °C, при $\tau=30$ мин, $V=60$ см ³ /с, $d=10$ мм	50	9,85	9,68	11,82	83,37
	100	10,68	10,69	11,79	90,59
	150	11,78	11,34	12,79	92,09
	190	11,69	11,74	12,82	91,18
	210	12,14	11,91	12,80	94,85
τ , мин, при $t=100$ °C, $V=60$ см ³ /с, $d=10$ мм	5	4,64	5,51	8,063	57,56
	10	7,46	7,12	10,33	72,26
	15	8,78	8,27	9,76	83,96
	30	10,68	10,69	12,18	87,68
	40	11,79	11,90	12,51	94,20
	60	11,87	13,83	12,61	94,13
d , мм, при $t=100$ °C, $V=60$ см ³ /с, $\tau=30$ мин	5	9,46	9,22	11,04	85,69
	8	10,55	10,11	11,76	89,71
	10	10,68	10,69	12,19	87,58
	12	11,74	11,29	12,85	91,35
V , см ³ /с, при $t=100$ °C, $\tau=30$ мин, $d=10$ мм	20	11,38	—	12,42	91,71
	40	11,43	—	12,61	90,64
	60	10,68	—	12,19	87,61
	80	11,59	—	12,57	92,20
	100	11,55	—	12,67	91,10

По мере увеличения размера гранул увеличивается и количество влаги, присутствующей в гранулах. Эти эффекты обусловлены изменением размера гранул за счет увеличения площадей сечения последних. С другой стороны, облегчается диффузия паров воды из центра гранул наружу, возрастает убыль их массы при нагревании. Однако в крупных гранулах, возможно, происходит растрескивание, за счет чего и происходит дополнительное удаление влаги.

Таблица 3. Коэффициент корреляции R и его значимость t_R для частных функций относительной убыли массы гранул после сушки

Функция относительной убыли массы гранул, %	R	Условие $t_R > 2$	Значимость
$W_1 = 5,585 t^{0,1442}$	0,9601	123,94 > 2	+
$W_1 = 2,914 \tau^{0,37}$	0,8474	6,012 > 2	+
$W_1 = 0,0024 V + 11,183$	0,0423	0 < 2	—
$W_1 = 0,3027 d + 7,9622$	0,9448	7,524 > 2	+

Таблица 4. Коэффициент корреляции R и его значимость t_R для частных функций степени обезвоживания гранул после сушки

Функция степени обезвоживания, %	R	Условие $t_R > 2$	Значимость
$\alpha = 62,232 t^{0,0772}$	0,8791	119,078 > 2	+
$\alpha = 40,135 \tau^{0,2218}$	0,9979	78,70 > 2	+
$\alpha = 0,0017 V + 90,55$	0,0009	0 < 2	—
$\alpha = -0,0098 d + 0,8275 d + 82,161$	0,7442	2,347 > 2	+

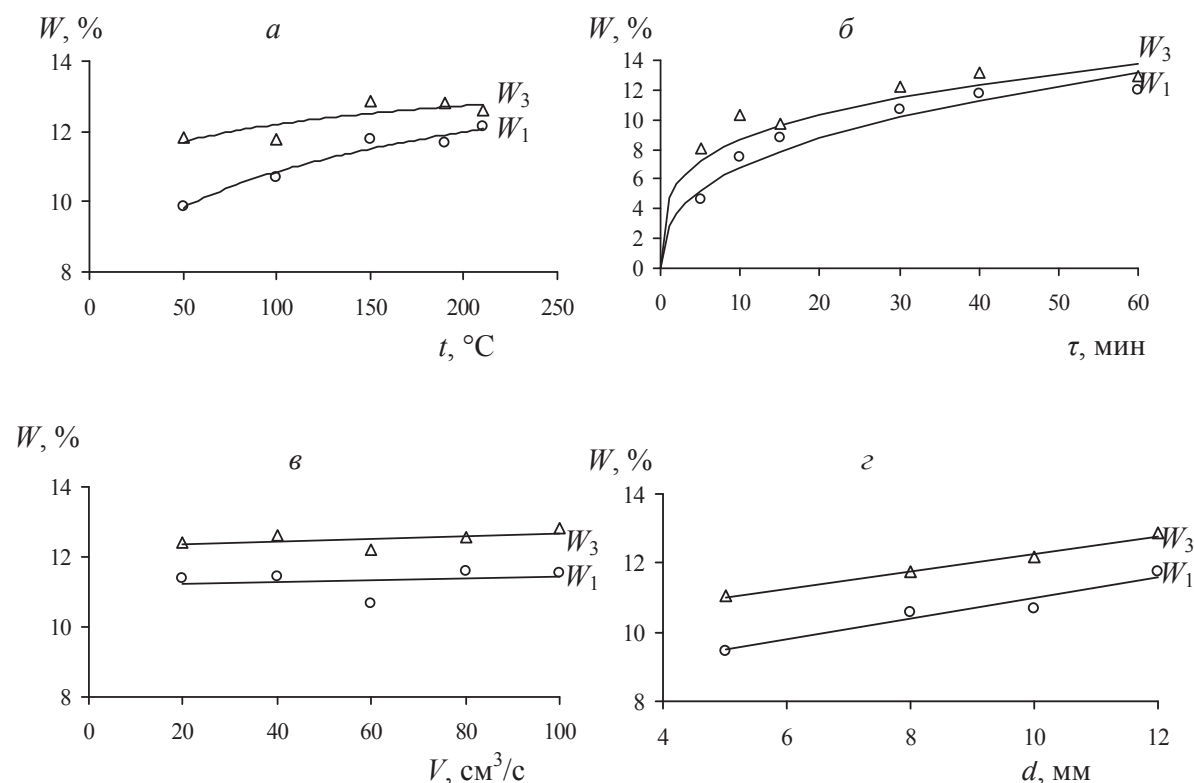


Рис. 1. Зависимости относительной убыли массы гранул после сушки (W_1) и после их досушивания при 105 °C (W_3) от: а) температуры; б) продолжительности сушки; в) расхода воздуха; г) размера гранул

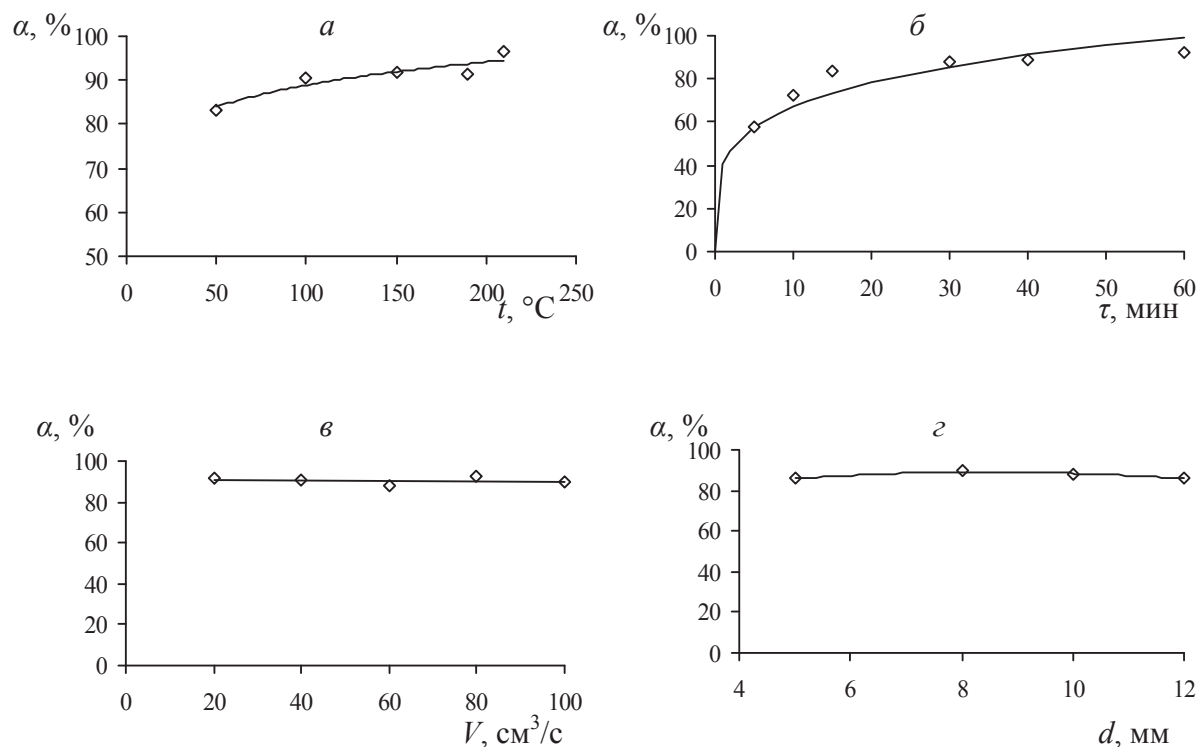


Рис. 2. Зависимости степени обезвоживания гранул от изучаемых факторов от: а) температуры; б) продолжительности сушки; в) расхода воздуха; г) размера гранул

Зависимость W_1 от времени характеризуется наличием крутого (первые 10 мин) и пологого (после 10 мин) участков. То есть наибольшая часть влаги удаляется из материала в первые 10 мин ведения процесса.

Полученные частные зависимости W_3 от варьируемых факторов практически повторяют по форме одноименные зависимости W_1 . Это подтверждает суждение о том, что значительное влияние на формирование функций W_1 и W_3 оказывают процессы удаления химически связанной влаги.

Согласно соотношению (1) W_3 равно сумме W_1 и W_2 . То есть W_3 при отсутствии химических превращений в ходе нагревания должно быть равно влажности исходного материала (содержанию в нем несвязанной воды).

Величина влажности последнего не зависит от условий термообработки материала. Значение W_3 должно быть неизменным. Несоблюдение этого условия свидетельствует о протекании процессов разложения гидратированных соединений. Только в данном случае W_3 может зависеть от температуры.

Предельное изменение массы влажных гранул той же фракции при 210 °C (210 °C – верхняя граница температуры) W_{210} равно:

$$W_{210} = \frac{(m'_1 - m'_3) \cdot 100}{m'_1} = 12,84,$$

где штрих относится к массе гранул после их термообработки при 210 °C.

Дополнительная потеря массы обусловлена разложением рассматриваемых соединений: $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ до $\text{CuSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ при 150 °C, а $\text{Zn}(\text{OH})_2$ до оксидов при 125 °C.

Таким образом, саму процедуру определения W_3 можно рассматривать как способ уточнения механизма обезвоживания материала и определения вклада, вносимого химическими реакциями в итоговые результаты процесса.

Полученные уравнения для относительной убыли массы и степени обезвоживания гранул после сушки (табл. 3, 4) с учетом значимых функций для описания совокупности действующих факторов обобщаются согласно [3] в виде их произведения с нормировкой по центральному экспериментальному значению в степени $(n-1)$, где n – число значимых частных функций. По центральному (ц) для всех функций условию ($t=100$ °C, $\tau=30$ мин, $d=10$ мм, $V=60$ см³/с) значение $W_{\text{ц}}=10,69$ % и $\alpha_{\text{ц}}=87,86$ %. Обобщенные уравнения выразятся как

$$W_1 = 8,74 \cdot 10^{-3} (5,585t^{0,1442})(2,914\tau^{0,37}) \times (0,3027d + 7,9622), \quad \%, \quad (4)$$

$$\alpha = 1,3 \cdot 10^{-4} (62,232t^{0,0772})(40,135\tau^{0,2218}) \times (0,8275d - 0,0098d^2 + 82,161), \quad \%. \quad (5)$$

При сопоставлении результатов эксперимента и расчета нашли значения коэффициента корреляции для относительной убыли массы и степени обезвоживания гранул после сушки $R=0,9455$,

$t_R=32,140>2$, $R=0,9393$, $t_R=28,750>2$ соответственно, что подтверждает адекватность описания данных эксперимента настоящим уравнением.

Сушку материала в промышленном аппарате рекомендуется вести при $150...180\text{ }^{\circ}\text{C}$, а достаточным временем пребывания материала в этом аппарате можно считать $20...30$ мин. Так, расчет по полученным уравнениям показывает, что при условиях ведения процесса $t=180\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau=20$ мин контролируемые показатели равны: $W_1=10,014\%$, $\alpha=84,031\%$.

Полученную модель (5) можно использовать для расчета продолжительности сушки при вариации температуры и диаметра гранул. Для этого необходимо заменить τ на α , т. е. численные коэффициенты являются постоянными, это позволяет обозначить их общей величиной, например K . Тогда обобщенное уравнение выразится как

$$\alpha = 5,20 \cdot 10^{-3} (62,232 t^{0,0772}) (\tau^{0,2218}) \times \\ \times (0,8275 d - 0,0098 d^2 + 82,161),$$

заменяя τ на α , получим

$$\tau = \left[\frac{K(62,232 t^{0,0772}) \times \left(0,8275 d - 0,0098 d^2 + 82,161 \right)}{\alpha} \right]^{\frac{1}{0,2218}}, \text{ мин. (6)}$$

Значения продолжительности сушки по уравнению (6) приведены в табл. 5 при различных заданных величинах температуры и диаметра гранул.

Таблица 5. Необходимая продолжительность сушки (мин) для достижения заданной степени обезвоживания при $\alpha=84,031\%$ от температуры и размера гранул

$t, ^{\circ}\text{C}$	$d, \text{мм}$			
	5	8	10	12
50	37,66	33,41	31,27	29,41
100	29,26	26,25	24,57	23,11
150	25,41	22,79	21,33	20,06
190	23,40	20,99	19,65	18,48
210	22,60	20,27	18,97	17,84

Необходимый для сушки расход воздуха рассчитывается по данным лабораторных опытов с навеской 26 г , для которой достаточный расход

воздуха составил (с избытком) $60\text{ см}^3/\text{с}$. Отсюда удельный расход V' выразится как

$$V' = \frac{60}{26} = 2,31\text{ см}^3 / (\text{с} \cdot \text{г}) = 8,31\text{ м}^3 / (\text{кг} \cdot \text{ч}).$$

Поэтому необходимый расход воздуха на сушку любой массы материала m при выше заданных условиях для расчета τ будет равным

$$V = V' \tau m, \text{ м}^3. \quad (7)$$

Полученные данные по ур. (7) при различной температуре сушки и диаметре гранул 10 мм представлены в табл. 6.

Таблица 6. Необходимый расход воздуха (м^3) для сушки гранул от заданной массы и температуры процесса

$m, \text{г}$	$t, ^{\circ}\text{C}$				
	50	100	150	190	210
10	2598	2041	1772	1632	1576
30	7795	6125	5317	4898	4729
50	12992	10208	8862	8164	7882
100	25985	20417	17725	16329	15764
200	51970	40835	35450	32658	31528
300	77956	61253	53175	48987	47292
400	103941	81670	70900	65316	63056
500	129926	102088	88626	81645	78820
700	181897	142923	124076	114304	110348
800	207883	163341	141801	130633	126112
1000	259853	204176	177252	163291	157640

Полученные данные могут быть использованы для выбора типа конструкции и размеров сушильного аппарата.

Выводы

1. Исследованы закономерности обезвоживания и изменение свойств гранулированного чернового медно-молибденового концентрата месторождения «Тастау» в ходе термической обработки.
2. Выявлены оптимальные области режимов сушки в интервале действующих факторов (температура — от 50 до $210\text{ }^{\circ}\text{C}$; время сушки от 5 до 60 мин; размер гранул от 5 до 12 мм ; расход воздуха от 20 до $100\text{ см}^3/\text{с}$), обеспечивающих степень обезвоживания не менее 84% , что является достаточным для подготовки материала к дальнейшей переработке.

4. Беляев С.В., Оралов Т.А., Малышев В.П. О методе расчета степени обезвоживания при термообработке материала в печи с наклонной газораспределительной решеткой // Комплексное использование минерального сырья. — 1994. — № 2. — С. 80–83.

Поступила 25.01.2012 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов В.И., Тихонов А.И. Обжиг медных руд и концентратов. — Свердловск: Metallurgizdat, 1958. — 280 с.
2. Букетов Е.А., Малышев В.П. Технологические процессы шахтного обжига в цветной металлургии. — Алма-Ата: Наука, 1973. — 345 с.
3. Малышев В.П. Математическое описание результатов многофакторного эксперимента, проведенного по методу Зейделя–Гаусса // Вестник АН КазССР. — 1978. — № 4. — С. 31–38.