

УДК 622.7

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ
КОНЦЕНТРАТОРА КНЕЛЬСОНА ДЛЯ ОБОГАЩЕНИЯ ХРОМОВОЙ РУДЫ
С ПОМОЩЬЮ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ПЛАНОВ БОКСА – БЕНКЕНА**

С. Саманли¹, О. Оней¹, О. Османли²

¹Ушакский университет,

E-mail: selcuk.samanli@usak.edu.tr, 64200, г. Ушак, Турция

²Компания по продаже строительной техники “OKSAN”, 64200, г. Ушак, Турция

Выполнены моделирование и оптимизационные испытания по обогащению хромовой руды концентратом Кнельсона. Для решения поставленной задачи использован метод трехуровневых экспериментальных планов Бокса – Бенкена. Для проверки уровня значимости независимых переменных и их взаимодействия проведен дисперсионный анализ при доверительном интервале 95%. С целью оценки содержания хромита в концентрате и доли его извлечения от значений независимых переменных получены квадратичные полиномиальные регрессионные уравнения. Максимальное содержание хромита в концентрате 54.77 % и максимальная доля извлечения 77.1 % получены при следующих параметрах: скорость потока воды 12 л/мин, скорость вращения чаши 1124.57 об./мин, доля твердого вещества 21.05 %. Рассчитанный коэффициент множественной детерминации R^2 содержания хромита в концентрате составил 0.996, доля его извлечения — 0.991. Эти значения показывают, что предлагаемая модель может быть рассмотрена как эффективная и пригодная к применению.

Хромовая руда, концентрат Кнельсона, моделирование и оптимизация, дисперсионный анализ, планы Бокса – Бенкена

DOI: 10.15372/FTPRPI20230113

Хромит — один из наиболее значимых минералов для промышленного использования. Он применяется в металлургической, огнеупорной, химической и литейной промышленности. Хромит имеет следующий теоретический минеральный состав: Cr_2O_3 (68 %) и FeO (32 %), однако в природе его невозможно встретить с таким составом из-за наличия примесей. По этой причине возникает необходимость обогащения хромовой руды различными методами. Важную роль при выборе наиболее подходящего метода обогащения играют минералогические, физические и химические свойства руды [1].

Для обогащения хромовых руд в основном используются гравитационные методы из-за разницы в удельном весе между хромитом и пустыми минералами, в частности серпентинитом [2]. Кроме того, для концентрации хромита применяются флотационные методы (отдельно или совместно с гравитационным методом), а также концентрация в сильном магнитном поле. Обогащение хромовой руды с помощью концентрата Кнельсона рассмотрено в [3, 4].

Согласно [5], Турция занимает шестое место среди наиболее крупных экспортеров хромовой руды в мире. Такие руды в основном извлекаются из серпентинитовых ультрамафических формаций, неравномерно разбросанных по территории Турции. Большая часть турецких хромовых месторождений относится к “альпийскому” типу, который обычно характеризуется высоким содержанием и хорошим качеством руды. Хромовая руда, добываемая из месторождений на востоке и юге Турции, обладает высоким содержанием Cr_2O_3 и сразу идет на продажу, несмотря на наличие предприятий по обогащению хромовой руды.

Один из наиболее распространенных сепараторов по обогащению руды — центробежный концентратор Кнельсона чашечного типа, в котором образуется кипящий слой, где концентрируется материал с малыми фракциями [6]. В основу принципа сепарации на концентраторе Кнельсона заложена разница между центробежными силами, возникающими в тяжелых и легких частицах [7, 8]. На эффективность концентратора значительно влияют такие параметры, как размер частиц и тип подаваемого материала, содержание концентрируемого вещества и скорость подачи материала, интенсивность центробежных сил, время цикла концентрации и скорость подачи воды. Даже небольшие изменения этих параметров способны значительно повлиять на эффективность сепарации [8]. Таким образом, необходимо подбирать экспериментальные режимы для определения оптимальных условий эксплуатации концентратора Кнельсона.

Для оптимизации процессов в сфере обогащения полезных ископаемых широко применяется многопараметрический анализ. Он прост в выполнении при использовании результатов, полученных на основе статистического плана эксперимента. В этом случае экспериментальные ошибки минимизированы [9, 10]. Планы Бокса–Бенкена являются планами второго порядка, зависящими от трехуровневых неполных факториальных планов [11].

В настоящей работе проведено исследование влияния скорости потока воды, частоты вращения чаши, доли твердого вещества на содержание хромита в концентрате и на эффективность обогащения хромовой руды концентратором Кнельсона с помощью экспериментальных планов Бокса–Бенкена. Оценка взаимодействия параметров друг с другом выполнена с помощью дисперсионного анализа (ANOVA). В результате рассчитаны оптимальные эксплуатационные параметры для получения максимального содержания хромита в концентрате и максимальной доли его извлечения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Образцы, использованные в экспериментах, получены на предприятии, осуществляющем горнодобывающую деятельность открытым способом в районе г. Ашкале провинции Эрзурум (Турция). Размер кусков образцов составлял примерно – 10 см. Все образцы хромовой руды измельчались до – 1 мм на щековой и вальцовой дробилках и перемешивались с помощью метода квартования. Для испытаний было заготовлено около 40 кг образцов хромовой руды.

Образцы, предназначенные для испытаний, размалывались в шаровой мельнице до размера частиц менее 300 мкм. После помола образцы в сухом виде просеивались через сито с отверстиями диаметром 300 мкм. Остатки подвергались повторному помолу. После помола хромовой руды до размера частиц менее 300 мкм материал перемешивался и помещался в отдельные мешки примерно по 2 кг. Затем один из репрезентативных образцов подвергался фракционному анализу частиц путем просеивания. В табл. 1 показано весовое распределение частиц по фракциям.

ТАБЛИЦА 1. Результаты фракционного анализа измельченного образца, %

Фракция, мкм	Весовая доля	Cr ₂ O ₃
– 300 + 212	26.90	36.33
– 212 + 150	13.26	34.93
– 150 + 106	19.30	36.92
– 106 + 75	12.00	37.61
– 75 + 53	12.36	29.70
– 53 + 38	10.08	26.40
– 38	6.10	19.02
Итого	100.00	33.53

Минералогический анализ хромовой руды, используемой в испытаниях, выполнен в лаборатории General Directorate of the Mineral Research & Exploration of Turkey (Главное управление по исследованию полезных ископаемых и геологической разведке Турции). На рис. 1 представлены изображения образцов хромовой руды в макро- и микроскопическом виде.

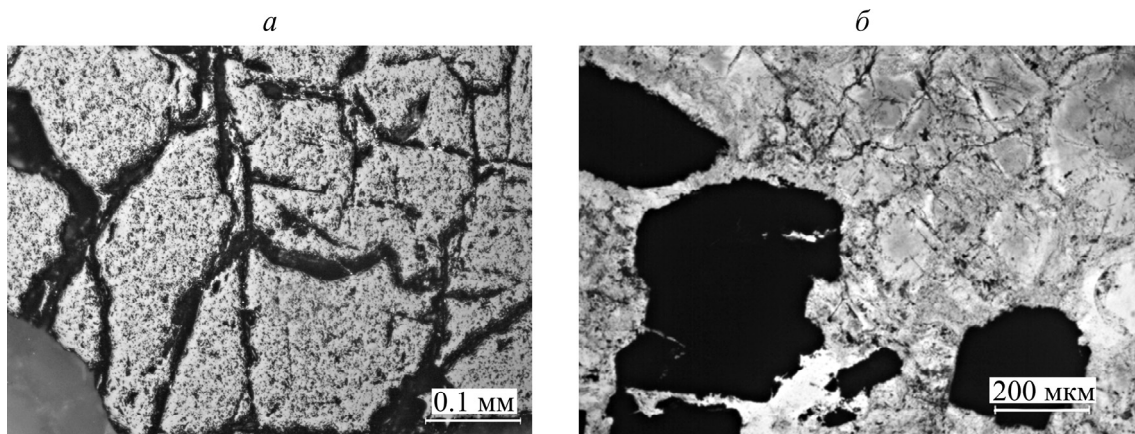


Рис. 1. Макроскопическое (а) и микроскопическое (б) изображения образцов хромовой руды

В результате макроскопического исследования в рамках качественного минералопетрографического анализа установлено, что хромит имеет зеленовато-серый цвет, массивную текстуру с некоторыми прослойками и зерна мелко-среднего размера. Образцы характеризуются сетчатой (ячеистой) структурой, основными компонентами являются серпентин и опактовые минералы (хромит и хлорит). Зерна серпентина имеют малый размер, волокнистую и ксеноморфную структуру, расположены в трещинах опактовых минералов и между ними. Зерна хлорита мелко-среднего размера (до 1.2 мм), красновато-черного цвета, частично автоморфной и ксеноморфной структуры с трещинами и разломами. Зерна хромита имеют малый размер, волокнистую структуру, некоторые зерна расположены между трещин и в опактовых минералах. Кроме того, зерна хромита кластеризованы в похожие области примерно с толщиной 2 см в прослойке. Данную горную породу можно отнести к серпентинитной ультрамафической породе. В ходе типового качественного минералогического анализа определено наличие хромита серпентиновой минеральной группы, хлоритовой минеральной группы и глины (в малом количестве) в виде смешанных слоев.

Для лабораторных испытаний по обогащению использовался лабораторный концентратор Кнельсона циклического действия КС-MD3 (мощность 120 Вт), скорость вращения чаши 800–2425 об./мин, производительность 0–45 кг/ч, доля твердого вещества в пульпе 0–75 %, максимальный размер частиц 1.7 мм). На рис. 2 приведена схема экспериментальной установки на базе концентратора Кнельсона. Для получения равномерного распределения образцы для испытаний подготавливались методом квартования из мешков по 2 кг. В конце каждого испытания полученные концентрат и остаток высушивались и взвешивались отдельно друг от друга. Затем они разделялись по 20 г и измельчались до фракции менее 100 мкм с помощью кольцевой мельницы для определения содержания Cr_2O_3 и выполнения химического анализа.

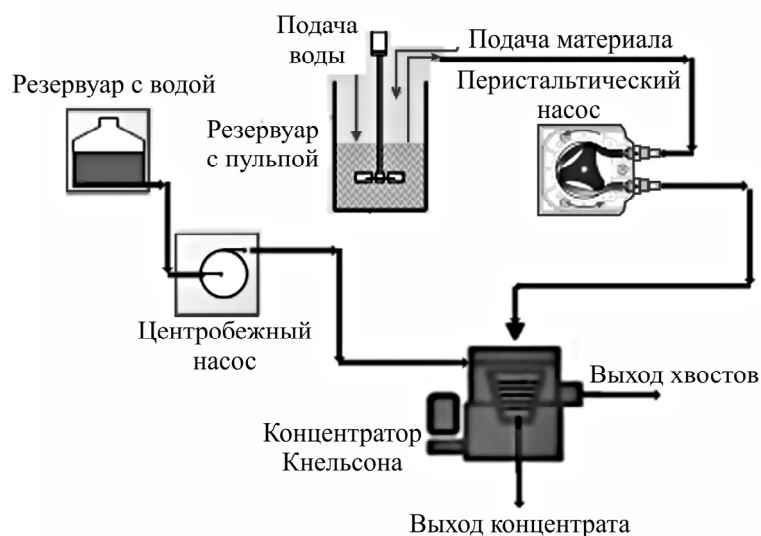


Рис. 2. Схема испытательной установки на базе концентратора Кнельсона

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследовалось влияние эксплуатационных параметров концентратора Кнельсона на содержание хромита в концентрате и долю его извлечения. Определялись значения независимых параметров и проводились испытания в соответствии с данными параметрами. Для каждого испытания получены зависимые переменные, после чего результаты анализировались статистическим образом.

Построены графики трехмерных поверхностей отклика и определены оптимальные экспериментальные условия. С этой целью скорость потока воды x_1 , частота вращения чаши x_2 и доля твердого вещества x_3 рассмотрены как независимые переменные. В табл. 2 представлены их значения. Согласно закодированным значениям рассчитаны диапазоны независимых переменных: скорость потока воды 6–12 л/мин, частота вращения чаши 800–1800 об./мин и доля твердого вещества 15–25 %.

В качестве зависимых переменных выбраны содержание хромита в концентрате и доля его извлечения. Для определения значений данных переменных использовалось следующее квадратичное полиномиальное уравнение:

$$Y_n = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_1^2 + \beta_5 x_2^2 + \beta_6 x_3^2 + \beta_7 x_1 x_2 + \beta_8 x_1 x_3 + \beta_9 x_2 x_3,$$

где Y_n — зависимая переменная (содержание хромита в концентрате и доля извлечения); x_1, x_2, x_3 — независимые переменные; β_0 — коэффициент регрессии; $\beta_1 - \beta_3$ — линейные коэффициенты; $\beta_4 - \beta_6$ — квадратичные коэффициенты; $\beta_7 - \beta_9$ — коэффициенты бинарного взаимодействия.

ТАБЛИЦА 2. Независимые переменные и их уровни для экспериментальных планов Бокса – Бенкена

Независимые переменные	Уровень независимых переменных		
	низкий	средний	высокий
	– 1	0	1
Скорость потока воды x_1 , л/мин	6	9	12
Частота вращения чаши x_2 , об./мин	800	1300	1800
Доля твердого вещества x_3 , %	15	20	25

В соответствии с экспериментальным планом Бокса – Бенкена выполнено 17 испытаний, пять из которых проведены в точках средних значений. В табл. 3 представлены уровни и фактические значения независимых и зависимых переменных, выбранных исходя из экспериментального плана.

Статистические анализы проведены на пробной версии ПО Design Expert 11. Результаты проанализированы при доверительном интервале 95 %, также выполнен дисперсионный анализ (ANOVA). В табл. 4 приведены окончательные значения статистических величин содержания хромита в концентрате и доли его извлечения. Коэффициент множественной детерминации R^2 уравнения квадратичной регрессии для содержания хромита в концентрате составил 0.996. Это свидетельствует о том, что три выявленные независимые переменные ответственны за 99.6 % изменения содержания хромита в концентрате. Таким же образом рассчитан коэффициент доли его извлечения, составляющий 0.991. Это подтверждает, что данная модель пригодна для применения.

ТАБЛИЦА 3. Закодированные и фактические значения независимых переменных и спрогнозированные значения зависимых переменных в ходе испытаний

Номер испытания	Независимые переменные						Зависимые переменные, %	
	Закодированный уровень			Фактические значения			Содержание хромита	Доля извлечения
	Скорость потока воды, л/мин	Частота вращения чаши, об./мин	Доля твердого вещества, %	Скорость потока воды, л/мин	Частота вращения чаши, об./мин	Доля твердого вещества, %		
1	0	1	1	9	1800	25	36.01	53.98
2	1	– 1	0	12	800	20	54.68	55.40
3	1	0	1	12	1300	25	49.20	73.41
4	– 1	– 1	0	6	800	20	48.83	73.94
5	0	0	0	9	1300	20	47.02	74.81
6	0	0	0	9	1300	20	46.65	73.18
7	– 1	0	– 1	6	1300	15	43.54	72.54
8	– 1	0	1	6	1300	25	41.43	66.90
9	1	0	– 1	12	1300	15	50.07	72.40
10	1	1	0	12	1800	20	40.64	67.67
11	0	0	0	9	1300	20	46.80	74.22
12	0	– 1	– 1	9	800	15	50.94	62.28
13	0	0	0	9	1300	20	46.78	73.42
14	0	1	– 1	9	1800	15	33.16	52.10
15	0	0	0	9	1300	20	46.75	74.54
16	0	– 1	1	9	800	25	49.63	65.42
17	– 1	1	0	6	1800	20	32.51	42.32

ТАБЛИЦА. 4. Результаты статистического анализа модели, %

Показатель	Содержание хромита	Доля извлечения
Среднеквадратичное отклонение (RMSD)	0.630	1.430
Коэффициент множественной детерминации R^2	0.996	0.991
Скорректированное R^2	0.990	0.979
Спрогнозированное R^2	0.932	0.871

В табл. 5 представлены результаты дисперсионного анализа (ANOVA) содержания хромита в концентрате и доли его извлечения: F -значение 177.33 для содержания показало значимость модели. Для получения значимых результатов вероятность $\text{Prob} > F$ в модели должна быть менее 0.05. В этом случае параметры, влияющие на содержание хромита, определены как x_1 , x_2 , x_2x_3 , x_2^2 и x_3^2 . Соответственно следующее квадратичное полиномиальное уравнение может быть выражено через закодированные значения содержания хромита в концентрате:

$$\text{Содержание} = 46.80 + 3.54x_1 - 7.72x_2 + 1.04x_2x_3 - 3.13x_2^2 - 1.235x_3^2.$$

ТАБЛИЦА 5. Дисперсионный анализ (ANOVA) содержания хромита в концентрате и доли его извлечения

Параметр	Содержание хромита					Доля извлечения				
	Сумма квадратов	df	RMSD	F -значение	Prob > F	Сумма квадратов	df	RMSD	F -значение	Prob > F
Модель	632.82	9	70.31	177.33	<0.0001	1538.16	9	170.91	83.62	<0.0001
Скорость потока воды x_1	99.97	1	99.96	252.12	<0.0001	21.71	1	21.71	10.62	<0.0139
Частота вращения чаши x_2	476.79	—	476.79	1202.45	<0.0001	209.82	1	209.82	102.65	<0.0001
Доля твердого вещества x_3	0.26	1	0.26	0.65	0.4454	0.02	1	0.02	0.01	0.9259
x_1x_2	1.30	1	1.30	3.28	0.1131	481.58	1	481.58	235.61	<0.0001
x_1x_3	0.38	1	0.38	0.97	0.3576	11.06	1	11.06	5.41	0.0529
x_2x_3	4.33	1	4.33	10.91	0.0131	0.40	1	0.40	0.19	0.6727
x_1^2	1.03	1	1.03	2.60	0.1508	1.87	1	1.87	0.92	0.3703
x_2^2	41.25	1	41.25	104.30	<0.0001	771.3	1	771.30	377.35	<0.0001
x_3^2	6.42	1	6.42	16.20	0.0050	17.77	1	17.77	8.70	0.0214
Невязка	2.78	7	0.40	—	—	14.31	7	2.04	—	—
Неадекватность	2.70	3	0.90	48.81	0.0013	12.31	3	4.10	8.21	0.0349
Чистая ошибка	0.07	4	0.02	—	—	2	4	0.50	—	—
Итого	635.59	16	—	—	—	1552.47	16	—	—	—

Аналогичным образом F -значение доли извлечения хромита, составляющее 83.62, показало значимость модели. Определены влияющие параметры: x_1 , x_2 , x_1x_2 , x_2^2 и x_3^2 . Соответственно может быть записано следующее квадратичное полиномиальное уравнение через закодированные значения доли извлечения хромита:

$$\text{Доля извлечения} = 74.03 + 1.65x_1 - 5.12x_2 + 10.97x_1x_2 - 13.53x_2^2 - 2.05x_3^2.$$

На рис. 3 представлена корреляция между фактическими и спрогнозированными значениями содержания хрома в концентрате и доли его извлечения. Видно, что результаты согласуются между собой.

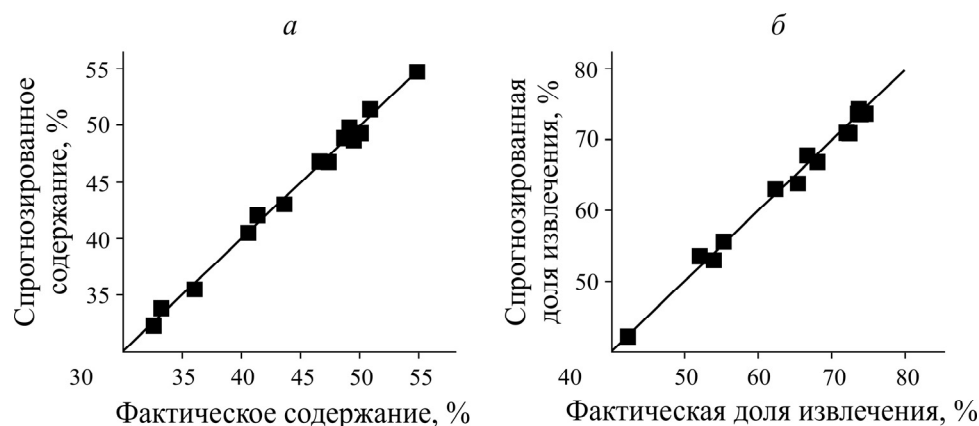


Рис. 3. Соотношение между фактическими и спрогнозированными значениями содержания хрома (а) и доли его извлечения (б)

На рис. 4 и 5 приведены трехмерные модели оценки содержания хрома и доли его извлечения. На рис. 4а показано влияние частоты вращения чаши и скорости потока воды (при постоянном значении доли твердого вещества 20 % в средней точке) на содержание хрома в концентрате. В этом случае наибольшее содержание получено при частоте вращения чаши 800 об./мин и скорости 12 л/мин. При увеличении скорости потока воды с 6 до 12 л/мин и постоянной частоте вращения чаши наблюдалось небольшое увеличение содержания. Следовательно, увеличение скорости потока воды способствует повышению содержания хрома в концентрате. При увеличении частоты вращения чаши содержание хрома в концентрате резко сократилось. Это свидетельствует о том, что на высоких скоростях зерна хрома перемешиваются с остатками и эффективность сепарации ухудшается. При частоте 800 об./мин и скорости 6 л/мин содержание Cr_2O_3 в концентрате составило 48.91 %, а при 1800 об./мин и той же скорости потока воды оно снизилось до 32.62 %. Данное значение близко к содержанию в сырьевом материале, поэтому концентрацию не следует осуществлять при высоких значениях частоты вращения чаши.

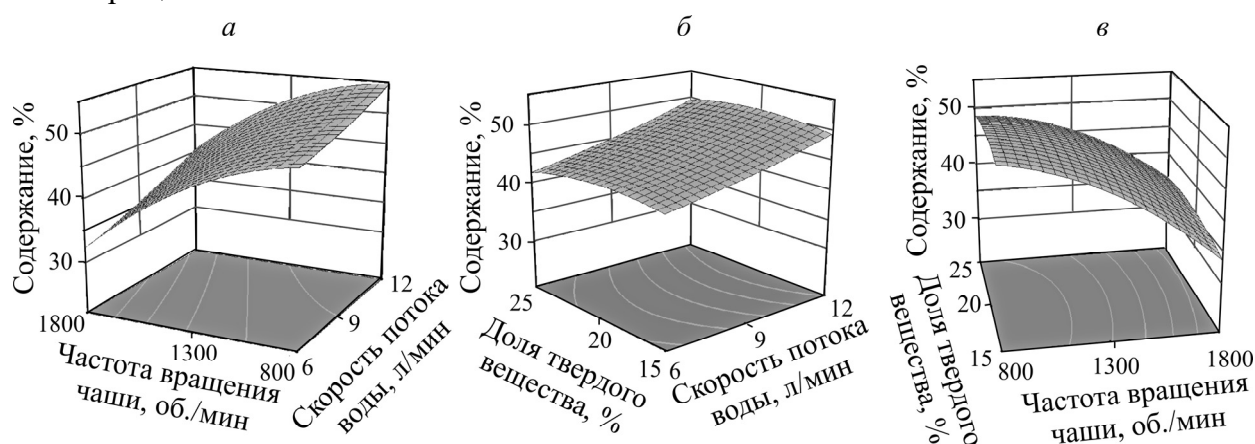


Рис. 4. Трехмерные поверхности отклика содержания хрома в концентрате (пояснения в тексте)

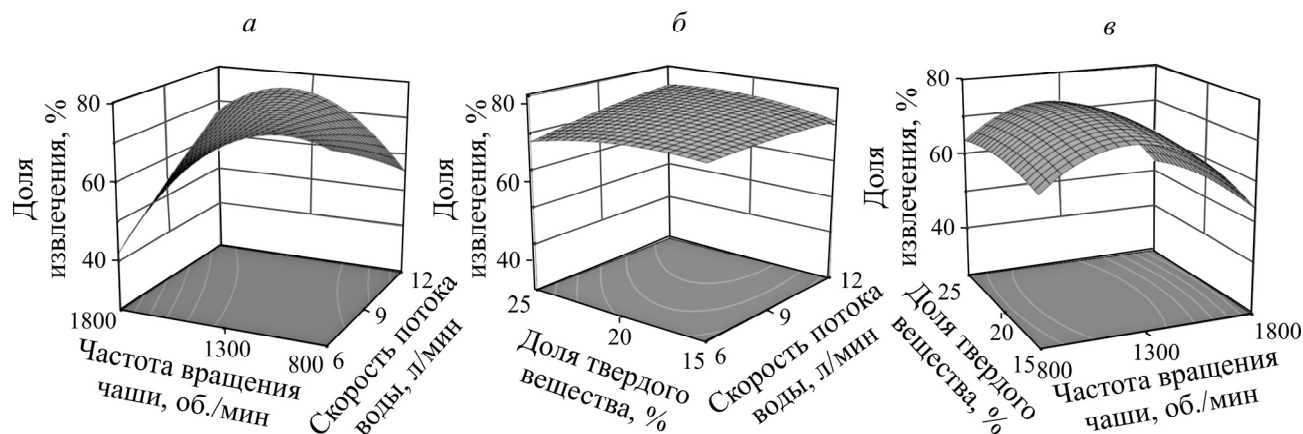


Рис. 5. Трехмерные поверхности отклика доли извлечения хрома в концентрате (пояснения в тексте)

Влияние доли твердого вещества и скорости потока воды (при постоянном значении частоты вращения чаши 1300 об./мин в средней точке) на содержание хрома в концентрате показано на рис. 4б. Видно, что влияние доли твердого вещества на содержание хрома весьма ограничено, а при увеличении скорости потока воды оно резко повышается. Наибольшие значения содержания хрома получены при среднем значении доли твердого вещества 20 % и наибольшей скорости воды.

На рис. 4в продемонстрировано влияние доли твердого вещества и частоты вращения чаши (при постоянном значении скорости потока воды 9 л/мин в средней точке) на содержание хрома в концентрате. Видно, что при увеличении частоты вращения чаши содержание хрома резко снижается. Таким образом, увеличение частоты вращения чаши негативно влияет на содержание хрома в концентрате. Стоит отметить, что влияние повышения доли твердого вещества на содержание хрома крайне мало. Наибольшие значения содержания хрома в концентрате получены при доле твердого вещества около 20 % и минимальной частоте вращения чаши 800 об./мин.

Влияние частоты вращения чаши и скорости потока воды (при постоянном значении доли твердого вещества 20 % в средней точке) на долю извлечения хрома показано на рис. 5а. Доля извлечения резко уменьшается при увеличении скорости потока воды и низкой частоте вращения чаши. При частоте вращения чаши 800 об./мин и скорости потока воды 6 л/мин доля извлечения хрома составляла 73.90 %, однако при той же частоте вращения и скорости потока 12 л/мин она снизилась до 56.69 %. Наблюдалось увеличение доли извлечения при повышении частоты вращения чаши, однако после 1300 об./мин она начала резко уменьшаться. Самое низкое значение доли извлечения (43.4 %) получено при 1800 об./мин (максимальная частота вращения чаши) и при минимальной скорости потока воды 6 л/мин.

На рис. 5б представлено влияние доли твердого вещества и скорости потока воды (при постоянном значении частоты вращения чаши 1300 об./мин в средней точке) на долю извлечения хрома. В рамках выбранных границ доли твердого вещества (15–25 %) ее влияние незначительно. Высокие значения доли извлечения хрома получены при значении доли твердого вещества около 20 %.

Влияние доли твердого вещества и частоты вращения чаши (при постоянном значении скорости потока воды 9 л/мин в средней точке) на долю извлечения хрома показано на рис. 5в. Установлено, что доля твердого вещества оказывает незначительное влияние, тогда как наибо-

лее значимым параметром является частота вращения чаши. Самое низкое значение доли извлечения хромита получено при максимальной частоте вращения чаши. После преодоления отметки 1300 об./мин наблюдалось резкое снижение доли извлечения хромита.

Оптимизация содержания хромита в концентрате и доли его извлечения. Цель испытаний, выполненных на концентраторе Кнельсона, — получение продукта с наибольшим содержанием Cr_2O_3 при наибольшей доли его извлечения. Для этого проведена оптимизация полученных результатов программным образом и определены следующие оптимальные параметры: скорость потока воды 12 л/мин, частота вращения чаши 1124.57 об./мин, доля твердого вещества 21.05 %. Согласно расчетам, при данных параметрах может быть получено содержание Cr_2O_3 51.77 % при доле его извлечения 74.1 %. В результате трех испытаний при оптимальных параметрах достигнуты следующие значения содержания хромита: 50.33 – 50.55 – 50.46 % и следующие значения доли его извлечения: 74.40 – 74.05 – 74.28 %. Среднее содержание Cr_2O_3 составило 50.45 %, средняя доля его извлечения — 74.54 %.

ВЫВОДЫ

В рамках выполненных испытаний по обогащению хромовой руды на концентраторе Кнельсона с помощью экспериментальных планов Бокса – Бенкена проведено исследование влияние доли твердого вещества, частоты вращения чаши и скорости потока воды на результаты обогащения. В ходе лабораторных испытаний выявлено, что может быть получен концентрат с максимальным содержанием Cr_2O_3 54.68 % (при доли извлечения 52.64 %) и максимальной долей извлечения 76.85 % (при содержании 47.52 %).

При оптимальных параметрах, полученных программным образом, расчетное значение содержания хромита в концентрате составило 51.7 %, расчетное значение доли извлечения — 74.10 %. В результате лабораторных испытаний при оптимальных параметрах получено среднее значение содержания Cr_2O_3 50.45 % и среднее значение доли его извлечения 74.24 %. Таким образом, данные, полученные экспериментальным образом, согласуются с расчетными данными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ferreira S. L. C., Bruns R. E., Ferreira H. S., Matos G. D., David J. M., Brand G. C., DaSilva E. G. P., Portugal L. A., Dos Reis P. S., Souza A. S., and Dos Santos W. N. L. Box – Behnken design: an alternative for the optimization of analytical methods, *Analytica Chimica Acta*, 2007, Vol. 597, No. 2. — P. 179 – 186.
2. Ucbas Y., Bozkurt V., Bilir K., and Ipek H. Separation of chromite from serpentine in fine sizes using magnetic carrier, *Separation Sci. and Technol.*, 2014, Vol. 49, No. 6. — P. 946 – 956.
3. Sen G. A. Application of full factorial experimental design and response surface methodology for chromite beneficiation by knelson concentrator, *Miner.*, 2016, Vol. 6, No. 5. — P. 1 – 11.
4. Bozkurt B. The impact of knelson gravity concentrator on recovery of chromium from enrichment plant waste, M. Sc. thesis (Supervisor: Asst. Prof. Zehra Ebru SAYIN), Afyon Kocatepe University Graduate School of Natural and Applied Sciences Department of Mining Engineering, Afyon, Turkey, 2017.
5. Agacayak T., Zedef V., and Aydogan S. Beneficiation of low-grade chromite ores of abandoned mine at Topraktepe, Beyşehir, SW Turkey, *Acta Montanistica Slovaca*, 2007, Vol. 12, No. 4. — P. 323 – 327.

6. **Majumder A. K., Tiwari V., and Barnwal J. P.** Separation characteristics of coal fines in a knelson concentrator hydrodynamic approach, *Coal Preparation*, 2007, Vol. 27. — P. 126–137.
7. **Koppalkar S.** Effect of operating variables in knelson concentrators: a pilot-scale study. PhD thesis, McGill University Department of Mining and Materials Eng., Montreal, Canada, 2009.
8. **Fatahi M. R. and Farzanegan A.** DEM simulation of laboratory knelson concentrator to study the effects of feed properties and operating parameters, *Advanced Powder Technol.*, 2017, Vol. 28, No. 6. — P. 1443–1458.
9. **Gupta T., Ghosh T., Akdogan G. and Bandopadhyay S.** Maximizing REE enrichment by froth flotation of alaskan coal using box-behnken design, *Mining, Metallurgy & Exploration*, 2019, Vol. 36. — P. 57–578.
10. **Aleksandrova T. N., Aleksandrov A. V., Litvinova N. M., and Bogomyakov R. V.** Basis and development of gold loss reduction methods in processing gold-bearing clays in the Khabarovsk territory, *J. Min. Sci.*, 2013, Vol. 49, No. 2. — P. 319–325.
11. **Freire L. A., Leite J. Y. P., Da Silva D., Da Silva B. G. and Oliveira J. C. S.** Behavior of the chromite tailings in a centrifugal concentrator (Falcon), *REM-Int. Eng. J.*, 2019, Vol. 72, No. 1. — P. 147–152.

Поступила в редакцию 06/V 2022

После доработки 03/XI 2022

Принята к публикации 19/I 2023