

EXTRACTION OF CHROME FROM FERROCHROME PRODUCTION SLAG USING THE SULFURIC ACID METHOD

R.M. Chernyakova, R.A. Kaiynbayeva, *G.Sh. Sultanbayeva,
U.Zh. Jussipbekov, N.N. Kozhabekova

JSC «A.B. Bekturov Institute of Chemical Sciences», Almaty, Kazakhstan

*E-mail: sultanbaeva@mail.ru

Abstract. *Introduction.* Currently, the development of industrial waste recycling processes that reduce the anthropogenic load on the biosphere and ensure the rational use of natural resources is an urgent task. Technogenic waste from ferrochrome production contains chromium, which is one of the most toxic components of industrial waste. To extract chromium from them, the most acceptable method is acid leaching. *The purpose of the work* is to study the influence of temperature, process duration and H₂SO₄ concentration on the extraction of chromium from high-carbon ferrochrome slag into a sulfuric acid solution. Using mathematical planning of a 3-factor experiment, experiments were carried out to extract chromium from the slags of high-carbon ferrochrome production. The H₂SO₄ concentration was varied from 5 to 95% by diluting the concentrated acid. The duration of the process ranged from 10 to 180 minutes at S:L = 1:30, the temperature varied from 22 to 90 °C. *Results and discussion.* The maximum transition of chromium into acid occurs at a temperature of 76-90 °C and a process duration of 145-180 minutes. The degree of extraction reaches 97.9%. The smallest amount of chromium, about 20 mg/L, passes into the weakly concentrated H₂SO₄ solution, the degree of leaching is low and equal to 20.6%. When using 50% H₂SO₄, the highest degree of transition of Cr (94.8%) from ferrochrome slag to sulfuric acid occurs at a high temperature of 90 °C in 150-180 minutes. Deeper extraction of chromium cations into acid occurs at 80-90 °C. The maximum content of Cr³⁺ in the acid is achieved in 46-107 minutes and amounts to (0.33-0.68)%. *Conclusions.* It was revealed that with increasing process duration and increasing temperature, the degree of extraction increases. The maximum transition of chromium into acid from high-carbon ferrochrome slag occurs at a temperature of 76-90 °C and a process duration of 145-180 minutes. The degree of extraction reaches 97.9%. An increase in the temperature of the process of leaching chromium from VUVC with concentrated sulfuric acid initiates the extraction of chromium from the raw material.

Key words: high-carbon ferrochrome slag, sulfuric acid, sulfuric acid leaching, trivalent chromium, recovery rate

<i>Raissa Michailovna Chernyakova</i>	<i>Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher; e-mail: chernyakova1947@mail.ru</i>
<i>Raushan Alibekovna Kaiynbaeva</i>	<i>Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, e-mail: raushan_1972@mail.ru</i>
<i>Gita Shamilyevna Sultanbayeva</i>	<i>Candidate of technical sciences; Senior Researcher, e-mail: sultanbaeva@mail.ru</i>

Citation: Chernyakova R.M., Kaiynbaeva R.A., Sultanbayeva production slag using the sulfuric acid method. *Chem. J. Kaz.*, 2024, 2(86), 5-14. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.51580/2024-2.2710-1185.16>

*Umirzak Zhumasilovich
Jussipbekov*

*Corresponding Member of the National Academy of Sciences
of the Republic of Kazakhstan, Professor, Doctor of Technical
Sciences, Head of the Laboratory of Chemistry of Fertilizers
and Salts, e-mail: jussipbekov@mail.ru*

*Nazym Nurgudyrovnа
Kozhabekova*

*Candidate of Chemical Sciences, Researcher, e-mail:
kojabekova@mail.ru*

ИЗВЛЕЧЕНИЕ ХРОМА ИЗ ШЛАКОВ ФЕРРОХРОМНОГО ПРОИЗВОДСТВА СЕРНОКИСЛОТНЫМ МЕТОДОМ

*Р.М.Чернякова, Р.А.Кайынбаева, Г.Ш.Султанбаева,
У.Ж.Джусупбеков, Н.Н.Кожабекова*

АО «Институт химических наук имени А.Б.Бектурова», Алматы, Казахстан

**E-mail: sultanbaeva@mail.ru*

Резюме. *Введение.* В настоящее время разработка процессов утилизации промышленных отходов, снижающих антропогенную нагрузку на биосферу и обеспечивающих рациональное использование природных ресурсов, является актуальной задачей. Техногенные отходы производства феррохрома содержат хром, который является одним из наиболее токсичных компонентов промышленных отходов. Для извлечения из них хрома наиболее приемлемым является метод кислотного выщелачивания. *Цель работы* - исследование влияния температуры, продолжительности процесса и концентрации H_2SO_4 на извлечение хрома из высокоуглеродистого феррохромшлака в сернокислотный раствор. С использованием математического планирования 3-х факторного эксперимента проведены опыты по извлечению хрома из шлаков производства высокоуглеродистого феррохрома. Концентрация H_2SO_4 изменялась от 5 до 95% путем разбавления концентрированной кислоты. Продолжительность процесса составляла от 10 до 180 мин при Т:Ж=1:30, температура варьировалась от 22 до 90 °С. *Результаты и обсуждение.* Максимальный переход хрома в кислоту происходит при температуре 76-90 °С и длительности процесса 145-180 мин. Степень извлечения при этом достигает 97,9%. В слабоконцентрированный раствор H_2SO_4 переходит наименьшее количество хрома около 20 мг/л, степень выщелачивания при этом низкая и равна 20,6 %. При использовании 50% H_2SO_4 наибольшая степень перехода Cr (94,8%) из феррохромшлака в серную кислоту происходит при высокой температуре 90 °С за 150-180 минут. Более глубокое извлечение катионов хрома в кислоту происходит при 80-90 °С. Максимальное содержание Cr^{3+} в кислоте достигается за 46-107 минут и составляет (0,33-0,68) %. *Выводы.* Выявлено, что с увеличением продолжительности процесса и повышением температуры степень извлечения возрастает. Максимальный переход хрома в кислоту из высокоуглеродистого феррохромшлака происходит при температуре 76-90 °С и длительности процесса 145-180 мин. Степень извлечения при этом достигает 97,9%. Повышение температуры процесса выщелачивания хрома из ВУФХ концентрированной серной кислотой инициирует извлечение хрома из сырья.

Ключевые слова: высокоуглеродистый феррохромшлак, серная кислота, сернокислотное выщелачивание, трехвалентный хром, степень извлечения

Чернякова Раиса Михайловна

Доктор технических наук, профессор

Кайынбаева Раушан Алибековна

Кандидат технических наук

Султанбаева Гита Шамильевна

Кандидат технических наук

Джусупбеков Омирзак Жумасилович

*Доктор технических наук, Член-корр. НАН РК,
профессор*

Кожабекова Назым Нургудыровна

Кандидат химических наук

1. Введение

В настоящее время проблемы техногенного загрязнения природной среды с каждым годом все более обостряются и начинают приобретать глобальный масштаб. Главным путем поступления хрома в окружающую природную среду являются предприятия по получению хрома и его соединений из хромовой руды и ее дальнейшей переработки. Немаловажную роль в этом играют промходы этих предприятий [1, 2]. В последние десятилетия одной из актуальных проблем является увеличение использования хрома среди тяжелых металлов в ряде видов антропогенного воздействия и производство хрома, загрязнение хромом почв и растений [3, 4]. Техногенные отходы производства феррохрома содержат хром, являющийся одним из наиболее токсичных компонентов промышленных отходов.

Переработка отвальных шлаков и извлечения из них металлических компонентов с последующим использованием их в качестве вторичного сырья является одной из актуальных проблем в металлургии. В отвалах Актюбинского завода ферросплавов складированы более 12 млн. тонн шлака феррохрома [5]. Анализ современной научной и патентной литературы по переработке и утилизации хромсодержащих шлаков от производства высокоуглеродистого феррохрома позволил выбрать метод серно-кислотной переработки шлаков Актюбинского завода ферросплавов. В работе [6] исследована возможность восстановления шестивалентного хрома с помощью традиционных и альтернативных реагентов. При этом большая часть предлагаемых решений связана с высокотемпературными процессами [7], с применением достаточно агрессивных реагентов. Для извлечения хрома из руд в способе [8] используется метод кислотного выщелачивания. Процесс осуществляется путем смешения хромитовой руды с марганцевым сырьем, содержащим двуокись марганца, размола смеси с введением концентрированной серной кислоты. Соотношение хромитовой руды к марганцевому сырью и серной кислоте варьируется от 1:1:1 до 1:2:10.

В настоящее время в Казахстане наблюдается избыток производства серной кислоты [9]. Поэтому более экономично использовать серную кислоту в качестве реагента выщелачивания хрома шлаков от производства феррохрома. *Цель работы* - исследование влияние ряда технологических параметров, таких как температура, продолжительность процесса и концентрация серной кислоты на извлечение хрома из высокоуглеродистого феррохромшлака в сернокислотный раствор.

2. Методы исследования

Для эксперимента в данной работе использовали шлак от производства высокоуглеродистого феррохрома. Перед проведением исследований

сделан отбор проб шлаков на АО «Актюбинский завод ферросплавов» по ГОСТУ 24991-81. С целью установления сложной зависимости и количественной оценки эксперимента, а также получения достоверных данных с применением метода математического планирования ортогонального рототабельного 3-х факторного эксперимента 2-го порядка был проведен ряд опытов [10]. С использованием компьютерной обработки экспериментальных данных проведён регрессионный анализ полученных результатов. Концентрация серной кислоты изменялась от 5 до 95% путем разбавления концентрированной кислоты. Продолжительность процесса составляла от 10 до 180 мин при Т: Ж=1:30, температура варьировалась от 22 до 90 °С. Число опытов в центре плана для трёхфакторного эксперимента равно 6. Для рототабельности плана также добавляются точки, расположенные на всех осях координат на одинаковых расстояниях $\pm\alpha$ от центра («звёздные точки»). Величина α является «звёздным плечом» и в кодированном виде составляет $\alpha=\pm 1.682$.

Таким образом, эксперимент проводили в количестве 20 опытов:

$$N=2^3+2\cdot 3+6=20 \quad (1)$$

В качестве входных параметров выбраны независимые факторы, влияющие на процесс извлечение: температура Т °С (z_1), время перемешивания $\tau_{\text{пер}}$ (z_2), концентрация серной кислоты $C_{\text{H}_2\text{SO}_4}$ (z_3). Выходным параметром является содержание хрома после выщелачивания (мг/л) Y (отклик).

3. Результаты и обсуждение

Координаты центра плана, интервалы варьирования и уровни исследования представлены в таблице 1.

Корреляционным анализом после исключения незначимых коэффициентов получено уравнение регрессии, описывающее степень извлечения хрома в зависимости от исследуемых параметров процесса:

$$Y_1=33.119+9.795X_1+6.544X_2+11.925X_1X_2-12.786X_2X_3 \quad (2)$$

а именно $4.6709 < 4.6999$, следовательно, уравнение адекватно описывает эксперимент.

Таблица 1 - Координаты центра плана, интервал варьирования и уровни исследования

Значение переменных			
Кодированное	Натуральное		
	Z ₁ , T, °C	Z ₂ , τ _{пер}	Z ₃ , C H ₂ SO ₄ , мг/л
Верхний уровень (+1)	76.2	145.6	76.8
Центр плана – нулевой уровень (z ₁ ⁰)	56	95	50
Нижний уровень (-1)	35.8	44.4	23.2
Звёздное плечо (+1.682)	90	180	95
Звёздное плечо (-1.682)	22	10	5

Условия опытов в виде матрицы планирования с кодированными значениями (X₁, X₂, X₃) и выходные параметры эксперимента по выщелачиванию хрома из высокоуглеродистого феррохромшлага приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Выходные параметры эксперимента по выщелачиванию хрома в растворах серной кислоты. Исходное содержание хрома 0.97%

№	Z ₁ T °C	Z ₂ Время, мин	Z ₃ C, %	X ₁	X ₂	X ₃	Y _{1cp} , содержание Cr, мг/л	Степень выщелачивания Cr, %
1	-1	-1	-1	35.8	44.4	23.2	36.67	37.80
2	+1	-1	-1	76.2	44.4	23.2	58.52	60.33
3	-1	+1	-1	35.8	145.6	23.2	28.89	29.78
4	+1	+1	-1	76.2	145.6	23.2	71.44	73.65
5	-1	-1	+1	35.8	44.4	76.8	42.78	44.10
6	+1	-1	+1	76.2	44.4	76.8	27.59	28.44
7	-1	+1	+1	35.8	145.6	76.8	15.74	16.23
8	+1	+1	+1	76.2	145.6	76.8	34.07	35.12
9	-1.682	0	0	22	95	50	15.65	16.13
10	+1.682	0	0	90	95	50	69.48	71.63
11	0	-1.682	0	56	10	50	20.00	20.62
12	0	+1.682	0	56	180	50	46.67	48.11
13	0	0	-1.682	56	95	5	39.82	41.05
14	0	0	+1.682	56	95	95	30.56	31.51
15	0	0	0	56	95	50	22.04	22.72
16	0	0	0	56	95	50	24.26	25.01
17	0	0	0	56	95	50	36.85	37.99
18	0	0	0	56	95	50	28.70	29.59
19	0	0	0	56	95	50	31.5	32.83
20	0	0	0	56	95	50	28.33	29.20

Анализ полученного уравнения регрессии показал, что содержание хрома является функцией всех переменных: температуры процесса (°C), времени перемешивания (мин), и концентрации серной кислоты (%). Однако

влияние этих факторов неравнозначно и выглядит следующим образом. Сравнение значений коэффициентов уравнения регрессии 2 показало, что наибольшее влияние на выходной параметр оказывает температура и время процесса.

Температура наряду с концентрацией H_2SO_4 оказывает значительное влияние на процесс извлечения хрома. Ниже приведена графическая зависимость извлечения хрома из феррохромшлака от температуры процесса (рисунок 1).

Кривые перехода Cr в H_2SO_4 в зависимости от температуры в исследуемых условиях носят прямолинейный и однотипный характер (рисунок 1). При использовании 23%-ной H_2SO_4 с увеличением температуры процесса кривые выщелачивания хрома характеризуются максимумом в области 60-80 °С (рисунок 1). При этом степень выщелачивания хрома составляет 98%. Как видно, с увеличением концентрации H_2SO_4 (50%) и с повышением температуры за 10 минут процесса содержание хрома в кислом растворе снижается.

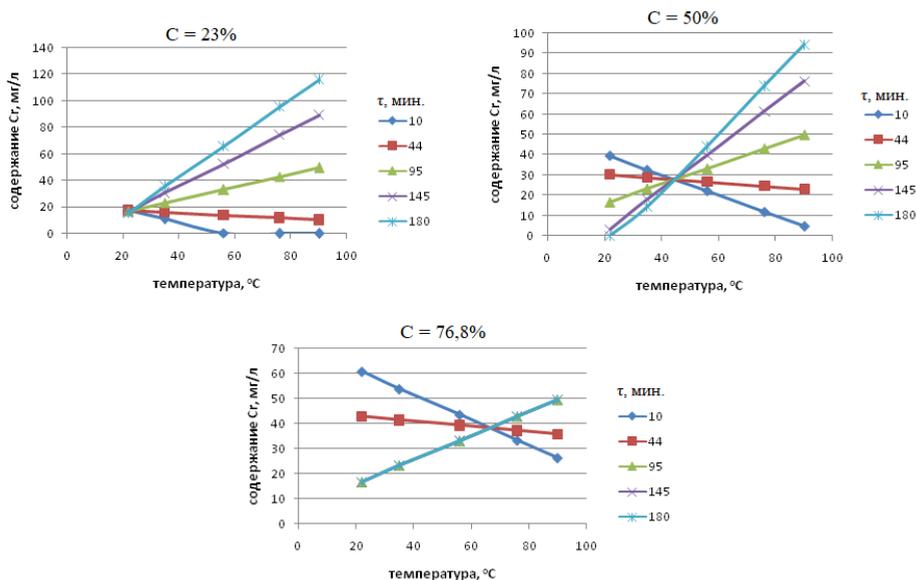


Рисунок 1 – Влияние температуры на выщелачивание Cr из феррохромшлаков (ВУФХ)

А за 145 -180 минут процесса содержание хрома с увеличением температуры до 90 °С повышается.

При высоких концентрациях H_2SO_4 (76.8-95.0%) характер кривых извлечения хрома имеет тенденцию уменьшения содержания хрома за промежуток времени 10-45 мин и постоянного его увеличения с продолжительностью процесса 95 и более минут. Максимальная степень выщелачивания хрома из феррохромшлака – 61.86% при минимальном его

содержании в растворе 60 мг/л отмечается при температуре 20 °С и 10 минут процесса.

Кинетические кривые перехода хрома из феррохромшлака в серную кислоту в зависимости от ее концентрации носят однопиковный характер во всем исследуемом интервале времени и температуре (рисунок 2).

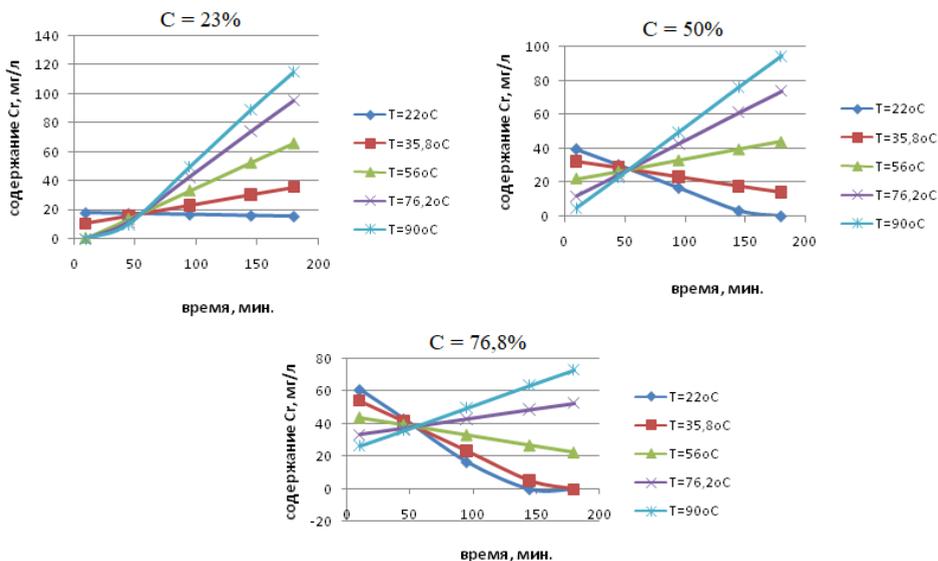


Рисунок 2 – Влияние времени на выщелачивание хрома из феррохромшлака (ВУФХ)

С увеличением продолжительности процесса и повышением температуры степень извлечения возрастает. Максимальный переход хрома в кислоту происходит при температуре 76-90 °С и длительности процесса 145-180 мин. Степень извлечения при этом достигает 97.9%. При низкой концентрации серной кислоты (23%) и низкой температуре выщелачивания содержание хрома практически остается постоянным, степень выщелачивания при этом низкая и равна 20.6 %. При использовании 50% H_2SO_4 наибольшая степень перехода Cr (94.8%) из феррохромшлака в серную кислоту происходит при высокой температуре 90°C за 150-180 минут.

Использование высоких концентраций серной кислоты (76.8-95.0%) в процессах выщелачивания с увеличением температуры (76.2-90 °С) наблюдается повышение перехода Cr в раствор до 50-72%, а при низких температурах 22-35 °С снижение содержания хрома в растворе.

Следует отметить, что заметное в количественном отношении их извлечение в кислоту происходит при 80-90 °С. Причем, в первую очередь в раствор переходит трехвалентный хром. Максимальное содержание Cr^{3+} в кислоте достигается за 46-107 минут и составляет (0.33-0.68) %.

Проведенные исследование влияния нормы серной кислоты на процесс перехода хрома в серную кислоту показано в таблице 3. Условия разложения выбраны из выше проведенного исследования.

Таблица 3 – Влияние нормы H_2SO_4 на переход Cr^{3+} из феррохромшлака в серную кислоту

Соотношение Т:Ж	Содержание Cr в растворе	
	мг/л	Степень перехода, отн.%
1: 30	71.44	73.64
1: 20	48.88	50.39
1: 10	87	88.69
1: 1	50	51.54

Процесс выщелачивания хрома проводили в следующих условиях: $C_{H_2SO_4}=23\%$, температура - $75\text{ }^\circ\text{C}$, время выщелачивания - 145 минут. Опыты проводили при соотношении «феррохромшлак- H_2SO_4 » (Т:Ж) равном 1:1, 1:10, 1:20 и 1:30 в условиях перемешивания.

Полученные результаты влияния соотношения компонентов на переход хрома из феррохромшлака показал, что степень перехода хрома для соотношения Т:Ж=1:1 составляет 51.54%, а повышение нормы кислоты до Т:Ж=1:10 приводит к увеличению и перехода хрома в раствор (88.69%). Дальнейшее повышение нормы кислоты Т:Ж=1:20 приводит к незначительную уменьшению перехода хрома в раствор кислоты и составляет 50.39%.

Таким образом, при разложении феррохромшлака 23%-ной серной кислотой достигается высокая степень извлечения хрома. Оптимальными условиями контакта хрома с серной кислотой, при которых происходит максимальный выход трехвалентного хрома в раствор являются: для ВУФХ $C_{H_2SO_4}=23\%$, температура – $75\text{ }^\circ\text{C}$, время выщелачивания - 145 минут при Т:Ж 1:10.

4. Выводы

Изучено влияние ряда технологических параметров (температура, время, концентрация H_2SO_4) на процесс извлечения хрома из высокоуглеродистого феррохромшлака в сернокислый раствор. Выявлено, что с увеличением продолжительности процесса и повышением температуры степень извлечения возрастает. Максимальный переход хрома в кислоту из высокоуглеродистого феррохромшлака происходит при температуре $76\text{-}90\text{ }^\circ\text{C}$ и длительности процесса 145-180 мин. Степень извлечения при этом достигает 97.9%. Повышение температуры процесса выщелачивания хрома из ВУФХ концентрированной серной кислотой инициирует извлечение хрома из сырья. Полученные результаты влияния соотношения компонентов на переход хрома из ВУФХ показал, что степень перехода хрома для соотношения Т:Ж=1:1 составляет 51.54%, а повышение

нормы кислоты до Т:Ж=1:10 приводит к увеличению и перехода хрома в раствор (88.69%).

Финансирование: работа выполнена в АО «Институт химических наук им. А.Б. Бектурова» в рамках программы целевого финансирования научных исследований на 2023-2025 годы, реализуемой Комитетом науки МНВО РК, по программе BR 21882220. (ПЦФ 23-25)

Конфликт интересов: конфликт интересов между авторами отсутствует.

ФЕРРОХРОМ ӨНДІРІС ШЛАГЫНАН КҮКІРТҚЫШҚЫЛДЫ ӘДІСПЕН ХРОМДЫ БӨЛІП АЛУ

*Р.М.Чернякова, Р.А.Кайыңбаева, Г.Ш.Султанбаева,
У.Ж.Джусипбеков, Н.Н.Кожабекова*

Ә.Б. Бектұров атындағы химия ғылымдары институты, Алматы, Қазақстан

**E-mail: sultanbaeva@mail.ru*

Түйіндеме. *Kіріспе.* Қазіргі уақытта биосфераға антропогендік жүктемені азайтатын және табиғи ресурстарды ұтымды пайдалануды қамтамасыз ететін өндірістік қалдықтарды қайта өңдеу процестерін дамыту кезек күттірмейтін міндет болып табылады. Феррохром өндірісінің техногендік қалдықтарының құрамында өнеркәсіптік қалдықтардың ең ұлы компоненттерінің бірі болып табылатын хром бар. Олардан хром алу үшін ең қолайлы әдіс қышқылмен шаймалау болып табылады. *Жұмыстың мақсаты* – жоғары көміртекті феррохром қожынан күкірт қышқылы ерітіндісіне хром алу кезінде температураның, процесс ұзақтығының және H_2SO_4 концентрациясының әсерін зерттеу. экспериментті математикалық жоспарлауды 3 факторлы әдістемесін қолдана отырып, жоғары көміртекті феррохром өндірісінің шлактарынан хром алу бойынша тәжірибелер жүргізілді. H_2SO_4 концентрациясы концентрлі қышқылды сұйылту арқылы 5-тен 95%-ға дейін өзгерді. Процестің ұзақтығы Қ:С = 1:30 кезінде 10-нан 180 минутқа дейін, температура 22-ден 90 °С-қа дейін өзгерді. *Нәтижелер мен пікірталас.* Хромның қышқылға максималды ауысуы 76-90 °С температурада және 145-180 минуттық процесс ұзақтығында болады. Шығару дәрежесі 97.9% жетеді. Әлсіз концентрлі H_2SO_4 ерітіндісіне хромның ең аз мөлшері шамамен 20 мг/л өтеді, шаймалау дәрежесі төмен және 20.6% тең. Ал 50% H_2SO_4 қолданғанда Сг (94.8%) феррохром шлактан күкірт қышқылына өтудің ең жоғары дәрежесі 90°С жоғары температурада 150-180 минутта болады. Хром катиондарының қышқылға тереңірек бөлінуі 80-90 °С-та жүреді. Қышқылдағы Cr^{3+} максималды мөлшері 46-107 минутта жетеді және (0.33-0.68)% құрайды. *Қорытындылар.* Процесс ұзақтығының ұлғаюымен және температураның жоғарылауымен ерітіндіге өту дәрежесі жоғарылайтыны анықталды. Хромның жоғары көміртекті феррохром шлактан қышқылға максималды өтуі 76-90°С температурада және процесс ұзақтығы 145-180 минутта жүреді. Шығару дәрежесі 97.9% жетеді. ЖКФХ-дан хромды концентрлі күкірт қышқылымен шаймалау процесінің температурасының жоғарылауы шикізаттан хромды бөледі бастайды.

Түйін сөздер: жоғары көміртекті феррохром шлактары, күкірт қышқылы, күкірт қышқылымен шаймалау, үш валентті хром, қалпына келтіру жылдамдығы

<i>Чернякова Раиса Михайловна</i>	<i>Техника ғылымдары докторы</i>
<i>Кайыңбаева Раушан Әлібекқызы</i>	<i>Техника ғылымдары кандидаты</i>
<i>Сұлтанбаева Гита Шамилқызы</i>	<i>Техника ғылымдары кандидаты</i>
<i>Жүсіпбеков Өмірзақ Жұмасылұлы</i>	<i>Техника ғылымдары докторы</i>
<i>Кожабекова Назым Нұргұдырқызы</i>	<i>Химия ғылымдары кандидаты</i>

Список литературы:

1. Мамырбаев А.А. Токсикология хрома и его соединений. Актөбе: ТОО «Информационно-полиграфический центр Көкжиек» **2012**, 284 с.
2. Мамырбаев А.А. Актуальные проблемы химической безопасности урбанизированных территорий в современных условиях. *Мед. журн. Западного Казахстана. (West Kazakhstan Medical)*. **2015**. С. 36-41. cyberleninka.ru/Грнтиn/aktualnye-problemy...
3. Даулетбаева М.М., Таныбаева А.К., Исмагулова Л.Н., Мұқанова Г.А., Рысмагамбетова А.А. Экологическая оценка влияния хрома на почву и растения города Актөбе. *Вестн. КазНУ. Серия геогр.* **2022**, 65 (2). 86-94. <https://doi.org/10.26577/JGEM.2022.v65.i2.08>
4. Бессонова В.П., Иващенко О.Е. Накопление хрома в растениях и его токсичность: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23861302>
5. Бондаренко И. В., Тастанов Е. А., Садыков Н. М-К., Исмагулова М.Ш. Переработка минеральной части шлаков рафинированного феррохрома с получением гранулированного пористого теплоизоляционного материала. *Компл. использование мин. сырья. № 4.* **2018**, <https://doi.org/10.31643/2018/6445.42>
6. Моделирование процесса восстановления шестивалентного хрома в сточных водах. М.Г. Ахмадиев, Ф.Ф. Шакиров, Л.М. Назипова [и др.]. *Вестн. Казан. технол. ун-та.* **2014**. Т. 17, № 8. С. 47-49. <https://elibrary.ru/>
7. А.с. 975580 СССР. Способ переработки хроматных шламов. Середя Б.П., Пономарева И.М., Портнягина Э.В. и др. Опул. **1982**.
8. Дюсенова С.Б. Разработка технологии комплексной переработки техногенных отходов хвостов обогащения Донского ТОКа: [дисс.на соиск. ст.докт.фил. PhD] Алматы. **2019**, С. 110. <https://official.satbayev.university/download/documentPhd/13864/Диссертация.pdf>
9. Электронный ресурс: <https://inbusiness.kz/ru/news/v-kazhastane-nablyudaetsya-izbytok-proizvodstva-sernoj-kisloty>
10. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии. М., *Высшая школа.* **1985**, 327. <https://djvu.online/file/NWx2LKHIffhPC>

References

1. Mamyrbayev A.A. Toxicology of chromium and its compounds. Aqtobe: *LLP Information and Printing Center Kokzhiek*, **2012**, 284.
2. Mamyrbayev A.A. Current problems of chemical safety of urbanized territories in modern conditions. *Med.Journ. of Western Kazakhstan (West Kazakhstan Medical)*. **2015**. pp. 36-41. cyberleninka.ru/Грнтиn/aktualnye-problemy...
3. Dauletbaeva M.M., Tanybaeva A.K., Ismagulova L.N., Mukanova G.A., Rysmagambetova A.A. Environmental assessment of the effect of chromium on soil and plants in the city of Aqtobe. *Bull. of KazNU. Geogr series* **2022**, 65 (2). 86-94. <https://doi.org/10.26577/JGEM.2022.v65.i2.08>
4. Bessonova V.P., Ivanchenko O.E. Accumulation of chromium in plants and its toxicity: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23861302>
5. Bondarenko I.V., Tastanov E.A., Sadykov N.M-K., Ismagulova M.Sh. Processing of the mineral part of refined ferrochrome slag to produce granular porous heat-insulating material. *Integrated use of min. raw materials.* **2018**, (4). 158-165. <https://doi.org/10.31643/2018/6445.42>
6. Modeling the process of recovery of hexavalent chromium in wastewater / M.G. Akhmadiev, F.F. Shakirov, L.M. Nazipova [and others]. *Bull of Kazan. technol. un-ty.* **2014**. V. 17, No. 8. P. 47-49. <https://elibrary.ru/>
7. A.s. 975580 USSR. Method for processing chromate sludge. Sereda B.P., Ponomareva I.M., Portnyagina E.V. and others. Publ. **1982**.
8. Dyusenova S.B. Development of a technology for complex processing of technogenic waste from enrichment tailings of the Donskoy TOK: [disser. for the degree of PhD]. Алматы. **2019**, 110. <https://official.satbayev.university/download/documentPhd/13864/Диссертация.pdf>
9. Electronic resource: <https://inbusiness.kz/ru/news/v-kazhastane-nablyudaetsya-izbytok-proizvodstva-sernoj-kisloty>
11. Akhnazarova S.L., Kafarov V.V. Optimization of experiments in chemistry and chemical technology. M., *Higher School.* **1985**, 327. <https://djvu.online/file/NWx2LKHIffhPC>