

Математическое моделирование процесса щелочного выщелачивания фтора из лежалого шлама алюминиевого производства

© А. Э. Бараускас¹, Ю. В. Сокольникова^{1,2}, Н. А. Чередников¹

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация

^{1,2}Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН,
г. Иркутск, Российская Федерация

Аннотация. Производство первичного алюминия в электролизёрах с самообжигающимися анодами сопровождается образованием различных фторсодержащих техногенных отходов (пыли электрофильтров, хвостов флотации угольной «пены», шлама «мокрой» газоочистки, образующих лежалый шлам). Эти отходы складываются вблизи предприятий, производящих первичный алюминий, что негативно влияет на экологическую ситуацию. Поэтому актуальной остается проблема возврата в процесс электролиза ценных компонентов лежалого шлама в виде фтористых солей (в частности, Na_3AlF_6). В связи с этим была разработана компьютерная программа для экспресс-расчета материального баланса электролиза криолит-глиноземного расплава, позволяющая контролировать приход и расход сырья, в том числе и содержащего фтор. С помощью программного комплекса «Селектор» создана математическая (термодинамическая) модель процесса выщелачивания фтора из лежалого шлама (на примере шлама Иркутского алюминиевого завода). В модель было введено 13 независимых компонентов согласно химическим составам пробы шлама, растворителя (едкого натра) и воздуха: Al, C, Ca, F, Fe, K, N, Na, S, Si, Ti, H, O. Установлено влияние температуры и соотношения жидкой и твердой фаз гетерогенной системы на переход фтора в раствор.

Ключевые слова: производство первичного алюминия, техногенное сырье, лежалый шлам, моделирование, выщелачивание фтора

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90212.

Mathematical modeling of the process of alkaline leaching of fluorine from old sludge of aluminum production

© Alyona E. Barauskas¹, Yulia V. Sokolnikova^{1,2}, Nikita A. Cherednikov¹

¹Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russian Federation

^{1,2}Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,
Irkutsk, Russian Federation

Abstract. The production of primary aluminum in electrolytic cells with self-baking anodes is accompanied by the formation of various fluorine-containing industrial wastes (dust from electrostatic precipitators, coal "foam" flotation tailings, wet gas cleaning sludge, that form stale sludge). These wastes are stored near enterprises producing primary aluminum. The problem of returning valuable components of old sludge to the electrolysis process in the form of fluoride salts (in particular, Na_3AlF_6) is relevant due to the deteriorating environmental situation near aluminum producers. In this regard, a computer program was developed for the express calculation of the material balance of the electrolysis of a cryolite-alumina melt, which makes it possible to control the supply and consumption of raw materials, including those containing fluorine. Using the Selector software package, a mathematical (thermodynamic) model of the process of leaching fluorine from old sludge was developed (using the sludge of the Irkutsk aluminum plant as an example). 13 independent components were introduced into the model according to the chemical composition of the sludge sample, solvent (caustic soda) and air: Al, C, Ca, F, Fe, K, N, Na, S, Si, Ti, H, O. The effect of temperature and the ratio of the liquid and solid phases of a heterogeneous system on the transition of fluorine into solution has been established.

Keywords: aluminium primary production, technogenic raw materials, sludge, stale sludge, modelling, fluorine leaching

Acknowledgment. The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the scientific project No. 20-38-90212.

Введение

Основным промышленным способом получения алюминия является электролиз криолит-глиноземных расплавов [1, 2]. На алюминиевых предприятиях компании «РУСАЛ» преобладают ванны с самообжигающимися анодами (анодами Содерберга). В данной конструкции электролизера непрерывно расходуется анодная масса, состоящая из нефтекоса и каменноугольного пека [3].

При получении алюминия образуются твердые и газообразные виды отходов, направляемые на переработку с целью извлечения ценных составляющих [4–7]. Так, в цехах, оснащенных ваннами с анодами Содерберга, для поддержания требуемого криолитового отношения в основном используют вторичный криолит, представляющий собой смесь флотационного криолита (ФК), получаемого путем переработки угольной пены, и регенерационного криолита (РК), осаждаемого из растворов «мокрой» газоочистки с помощью алюмината натрия и бикарбоната натрия [2].

Для максимального возврата ценного фтора в технологический процесс необходимы знания о балансе поступления фторсодержащих компонентов в процесс электролиза и оперативный расчет прихода и расхода фторсодержащего сырья. Для этого используют различные виды математической

обработки исходных данных и расчеты с помощью программ. При расчете данного или подобного баланса можно использовать различные значения мощности и производительности ванны, содержания ценного компонента в исходном сырье и продуктах процесса, эффективности газоочистных сооружений (в частности, «мокрой» очистки газов, используемой на алюминиевых предприятиях, оснащенных ваннами с анодами Содерберга).

Экспресс-расчет материального баланса фтора при производстве вторичного криолита на алюминиевых предприятиях

Как известно, материальный баланс – соотношение между количеством поступающих исходных сырьевых и иных материалов в процесс и полученными готовыми продуктами, а также отходами производства.

При расчёте необходимо знать конструктивные особенности электролизера (рис. 1), его производительность и оптимальный срок службы, частоту и длительность анодных эффектов (АЭ), КПД «мокрой» газоочистки по фтористому водороду и твердым фторидам, а также содержание фтора в сырьевых материалах, поступающих в процесс, отходящих газах и фтористых солях, расходуемых на пуск ванны в пусковой период после капитального ремонта электролизера.

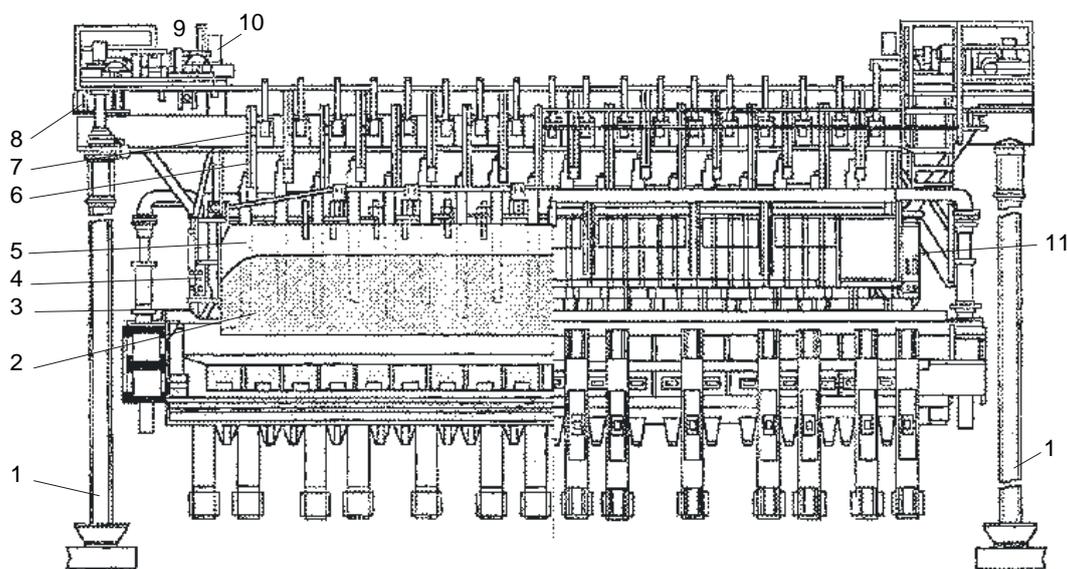


Рис. 1. Электролизер с анодом Содерберга (продольный разрез) [2]: 1 – стойка; 2 – анод; 3 – газосборный колокол; 4 – анодный кожух; 5 – анодный штырь; 6 – алюминиевая штанга штыря; 7 – зажим; 8 – домкрат основного механизма; 9 – электродвигатель основного механизма подъема анода; 10 – электродвигатель вспомогательного механизма подъема; 11 – горелка

При составлении баланса фтора, поступающего с сырьем и расходуемого в процессе электролиза криолит-глиноземных расплавов, необходимо знать геометрические размеры шахты (ширину и длину); расход фтора с газами и пылью; механические потери; выход угольной «пены» в процессе электролиза на стандартной или «сухой» (т. е. с пониженным количеством каменноугольного пека) анодной массе. Также необходимо знать количество поступающего в процесс сырья: глинозема, анодной массы, фтористых солей. В табл. 1, 2 приведены исходные данные для расчёта.

Таблица 1. Основные параметры электролизера с анодом Содерберга

Сила тока, А	Анодная плотность тока, А/см ²	Выход по току, %	Срок службы электролизёра, лет	Количество во АЭ, шт	Длительность АЭ, мин
160000	0,655	90	5,6	1	2

Таблица 2. Показатели для расчета баланса фтора процесса электролиза в электролизере на 160 кА

Ширина шахты, м ²	Длина шахты, м ²	Механические потери, %	Выход «пены» при работе на «сухой» анодной массе, г	Расход фтора с газами и пылью, кг
3,9	9,8	4,45	27,25	20,12

В нашей работе мы использовали для составления программы расчета материального баланса пакет прикладных программ Microsoft (MS) Excel. Для того чтобы начать строить программу в MS Excel, необходимо рассчитать баланс фтора и далее весь материальный баланс процесса электролиза в формате MS Word. Подготовка исходных данных к расчету ведется в определенной последовательности: 1 – рассчитывается удельный расход и приход фтора, 2 – рассчитывается эффективность улавливания фтора. После этого производится расчёт баланса фтора для электролизера с анодом Содерберга.

При составлении баланса фтора необходимо провести также расчет удельного количества фтористых соединений, выделяющихся в корпусе электролиза, с учетом периодов ведения регламентных обработок.

Установить распределение фторсодержащих соединений между атмосферой

корпуса электролиза и системой газоотсоса возможно с помощью расчёта эффективности улавливания фторидов колокольным газоотсосом $\mathcal{E}_{\phi}^{ГК}$.

$\mathcal{E}_{\phi}^{ГК}$ рассчитывается по формуле

$$\mathcal{E}_{\phi}^{ГК} = \mathcal{E}_{\phi 1}^{ГК} \cdot T_1 + \mathcal{E}_{\phi 2}^{ГК} \cdot T_2 + \mathcal{E}_{\phi 3}^{ГК} \cdot T_3 + \mathcal{E}_{\phi 4}^{ГК} \cdot T_4 + \mathcal{E}_{\phi 5}^{ГК} \cdot T_5,$$

где 1, 2, 3, 4, 5 – технологические операции, соответственно: регламентированная обработка (загрузка сырья); ликвидация АЭ; выливка алюминия и технологические замеры (уровней металла и электролита); ремонт пояса подвески колокола; работа с герметичным колокольным укрытием;

$\mathcal{E}_{\phi 1,2,3,4,5}^{ГК}$ – эффективность улавливания фтора газосборным колоколом во время выполнения технологических операций, д. ед.;

$T_{1,2,3,4,5}$ – длительность технологических операций, д. ед. (принимается согласно данным практики).

Согласно практическим данным $\mathcal{E}_{\phi 1,2,3,4,5}^{ГК}$ принимается:

$$\mathcal{E}_{\phi 1}^{ГК} = 0,35; \mathcal{E}_{\phi 2}^{ГК} = 0,35; \mathcal{E}_{\phi 3}^{ГК} = 0,6; \mathcal{E}_{\phi 4}^{ГК} = 0,1; \mathcal{E}_{\phi 5}^{ГК} = 0,92.$$

На рис. 2 представлен скриншот фрагмента программы для ЭВМ с расчетом баланса фтора.

После вычисления количества фтора, поступающего в процесс в виде регенерационного, флотационного криолита и фтористых солей на пуск ванны, приступаем к расчету материального баланса (исходные данные приведены в табл. 3).

При расчете удельного расхода сырья необходимо знать также соотношение количества углекислого и угарного газов в отходящей газовой смеси. В соответствии с данными производственной практики алюминиевого предприятия примем следующее соотношение: CO₂ : CO = 68,85 : 31,15.

На рис. 3 приведен скриншот экрана с рассчитанным в разработанной компьютерной программе материальным балансом процесса электролиза.

Удельный приход фтора					Удельный расход фтора		
Статья	кг/т	% F, во фторосолях	В пересчете на F, кг/т	%	Статья	В пересчете на F, кг/т	%
Фтористый алюминий	22,95	61,00	14,00	40,66	Для пропитки футеровки	3,71	10,78
Криолит флотационный	18,25	43,00	7,848	22,80	В виде углефторидов	0,345	1,00
Криолит регенерационный	20,63	43,00	8,869	25,76	Механические потери	1,532	4,45
Фторсоли на пуск электролизера после капремонта	6,87	54,00	3,71	10,78	С угольной "пенной"	8,72	25,33
					В виде газа и пыли	20,12	58,44
Итого			34,427	100,00	100	34,427	100,00

Рис. 2. Таблица расчёта баланса фтора в процессе электролиза в MS Excel

Таблица 3. Данные для расчета удельного прихода сырья при расчете материального баланса процесса электролиза

Al ₂ O ₃ , кг	Расход анодной массы, кг	Выход угольной «пены»	ФК, кг	ПК, кг
1920,5	518,1	27,25	18,25	20,63

Приход	кг/ч	%	Расход	кг/ч	%
Глинозем	92,741	76,596	алюминий	48,2976	39,89
Анодная масса	25,02	20,664	анодные газы:		
Фтористые соли	3,3175	2,74	CO ₂	48,140	39,76
			CO	13,860	11,45
			потери:		
			глинозем	1,473	1,22
			фторсоли	3,3175	2,74
			анодная масса	5,950	4,91
			Невязка	0,04	0,03
Всего	121,078	100	Всего	121,078	100

Рис. 3. Таблица расчёта материального баланса процесса электролиза в MS Excel

Созданная программа получила свидетельство о государственной регистрации для ЭВМ [8].

Моделирование процесса выщелачивания фтора из техногенного сырья алюминиевого производства

При осуществлении технологического процесса на электролизёрах с анодом Содерберга неизбежно образуются мелкодисперсные техногенные отходы (пыль электрофильтров, хвосты флотации поле переработки угольной пены, шлам «мокрой» газоочистки [9]). Данные материалы направляются на шламовые поля вблизи алюминиевых предприятий, что приводит к загрязнению окружающей среды. В то же время в данном виде отходов содержатся ценные соединения, извлечение которых и возврат в процесс электролиза в виде фтористый солей (в частности, криолита) является актуальной задачей.

Согласно результатам исследований авторов, опубликованных в [9], основными соединениями в составе пробы лежалого шлама (с крупностью частиц в среднем –50 мкм), отобранной со шламоохранилища филиала ПАО «РУСАЛ Братск» в г. Шелехов ОК «РУСАЛ» (Иркутская область), являются криолит (78,7%), хиолит, следы оксида алюминия, сульфат натрия, углерод (11,9 %), флюорит, эльпазолит, следы карбоната ряда доломита (4,44 %).

Для оценки термодинамической вероятности взаимодействия компонентов лежалого шлама с раствором NaOH в процессе выщелачивания целесообразно применять методы математического моделирования, основанные на знании физико-химических закономерностей конкретной реакции [10].

В своих исследованиях мы использовали основанный на принципе минимизации энергии Гиббса программный комплекс (ПК) «Селектор», который широко применяется для изучения различных металлургических процессов. Данный программный продукт был разработан профессором И. К. Карповым в 1973 г. [11].

Механизм работы программного комплекса основан на алгоритмах, объединенных в различные блоки. В ПК встроены

стандартные базы сведений о компонентах водных растворов, газов, жидких углеводородов, расплавов, твердых веществ и минералов. Разработчик выбирает последовательность действий в программе (ввод данных о химическом составе компонентов, определение температурных зон моделируемого металлургического агрегата и т. д.). ПК автоматически обрабатывает результаты моделирования, подбирая и упорядочивая необходимую информацию и представляя ее в табличном формате (Grafer, MS Excel и др.). При изучении физико-химических процессов ПК «Селектор» позволяет решать многие задачи посредством компьютерного моделирования термодинамических систем, поскольку он имеет расширенную базу термодинамических данных и встроенную подпрограмму управления ими. Термодинамические свойства компонентов системы были взяты из базы данных ПК «Селектор»: g_janaf.DB, g_Yokokawa.DB, g_Reid.DB, s_RobieHemingway.DB, s_sprons98.DB [12–15].

Построение модели процесса выщелачивания фтора из лежалого шлама, полученного при производстве алюминия

Математическая модель процесса выщелачивания фтора из пробы лежалого шлама с Иркутского алюминиевого завода формируется поэтапно. На рис. 4 представлена последовательность создания математической (термодинамической) модели.

Разработанная математическая модель показывает взаимодействие твердой и жидкой фаз изучаемой гетерогенной системы: лежалого шлама и растворителя. Основной целью физико-химического моделирования являлось определение оптимальных условий извлечения фтора (как ценного компонента) из пробы лежалого шлама. С помощью полученной модели было оценено поведение компонентов лежалого шлама в процессе щелочной переработки при взаимодействии с раствором 2 % едкого натра.

С учетом данных о химическом составе усредненной пробы лежалого шлама нами был определен набор независимых компонентов: C, F, Al, Na, K, Fe, S, Ca, Si, Ti. Для

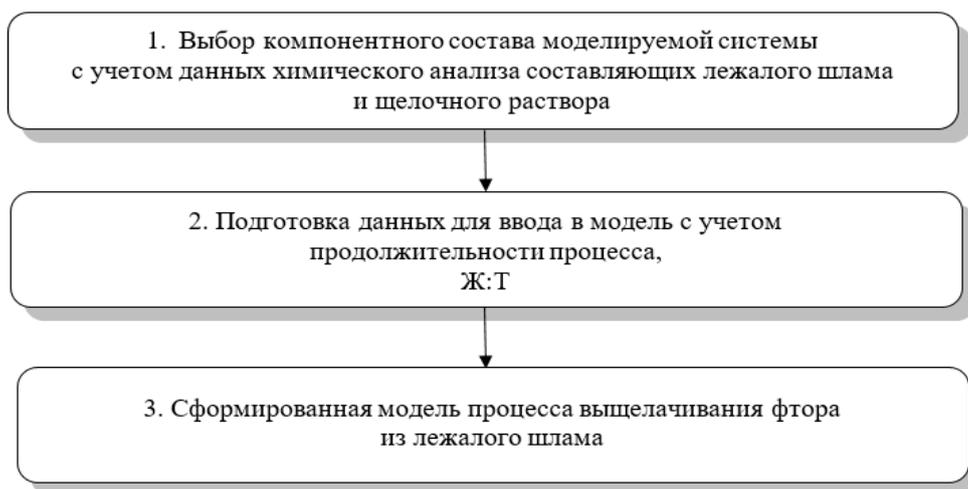


Рис. 4. Алгоритм формирования математической модели выщелачивания фтора из лежалого шлама

ввода в модель содержание компонентов в шламе в % масс. требуется пересчитать в мольные количества. Кроме перечисленных компонентов в модели присутствует N как компонент воздуха, H и O как компоненты щелочного раствора.

Результаты моделирования и их анализ

При моделировании в ПК «Селектор» программа выдает полную информацию о составе жидкой и твердой фаз гетерогенной системы (фрагмент решения программы при температуре 30 °С показан на рис. 5; Ж : Т = 6 : 1). Нерастворимыми компонентами

являются Al_2O_3 , Fe_2TiO_4 , C, нефелин.

Результаты моделирования процесса выщелачивания фтора из лежалого шлама на основе физико-химических закономерностей позволяют сделать вывод о том, что с увеличением продолжительности процесса растворимость CaF_2 увеличивается, а также возрастает концентрация NaF и общего содержания F^- в растворе. При этом отмечается, что чем меньше Ж : Т, тем больше концентрация NaF и F^- в растворе (рис. 6). Графическая интерпретация результатов моделирования была выполнена с помощью редактора Grapher (v. 15).

Ж к Т 6 к 1.TXT – Блокнот

АLENA6

Variant 1

Temperature, C	30.00	G, cal	-19867644	Eh, B	0.6988
Pressure, bar	1.00	H, cal	-23572320	pe	11.6407
Volume, cm ³	789239.875	S, cal/K	8091.453	pH	8.5156
Mass, kg	7.207	U, cal	-23444042	Ion strength	0.5704
Density, g/cm ³	0.009132	Cr, cal	6222.19	TDS, mg/kg H2O	41688.4461183

Phase parameters:

name phase	volume, cm ³	mole quantity	mass, g	density, g/cm ³	weight %	sol.wt. %	sol.v0
water	6093.31815	3.39939e+02	6256.7808	1.02683e+00	86.81367		
gas	783139.92586	3.15046e+01	924.4360	1.18042e-03	12.82667		
Hem	6.47132e-05	2.13767e-06	3.4137e-04	5.27507e+00	4.73651e-06	0.00132	
Al2O3(cr)	5.41842	2.09670e-01	21.3782	3.94546e+00	2.96625e-01	82.47641	
F1	3.97983e-01	1.62171e-02	1.2661	3.18137e+00	1.75677e-02	4.88470	
Kln	4.58212e-01	4.60441e-03	1.1887	2.59413e+00	1.64928e-02	4.58582	
Fe2TiO4	3.95643e-01	1.30693e-02	2.0870	5.27507e+00	2.89580e-02	8.05176	

Independent components:

chemical composition	disparity balance	molality	mg/kg sol	dual solution	chemical potential	log molality
Al	0.5259061	2.1820e-08	1.621e-02	4.374e+02	-311.76261	-187811
C	4.4103601	1.2983e-08	4.044e-01	4.857e+03	-156.74415	-94425

Рис. 5. Фрагмент решения модели процесса выщелачивания фтора (ПК «Селектор»)

Как показали результаты моделирования, температура является основным фактором, способствующим увеличению количества фтора, извлекаемого в раствор (рис. 7).

Заключение

Проблема переработки техногенных отходов алюминиевого производства является актуальной ввиду наличия в них ценных фторсодержащих компонентов. Для экспресс-расчетов, позволяющих вести учет образования продуктов электролиза, была разработана компьютерная программа в редакторе MS Excel «Расчет материального баланса процесса электролиза криолит-глиноземных расплавов в электролизерах с самообжигающимися

анодами». Кроме того, с помощью программного комплекса «Селектор» была сформирована физико-химическая (математическая) модель процесса выщелачивания фтора из техногенного фторсодержащего сырья. В математической модели представлено взаимодействие двух фаз гетерогенной системы: лежалого шлама (твердое) и растворителя (жидкое).

На основе термодинамического анализа физико-химических взаимодействий компонентов лежалого шлама с растворителем (2 % NaOH) установлено, что температура и соотношение жидкой и твердой фаз влияют на переход фтора в раствор до достижения концентрации, необходимой для последую-

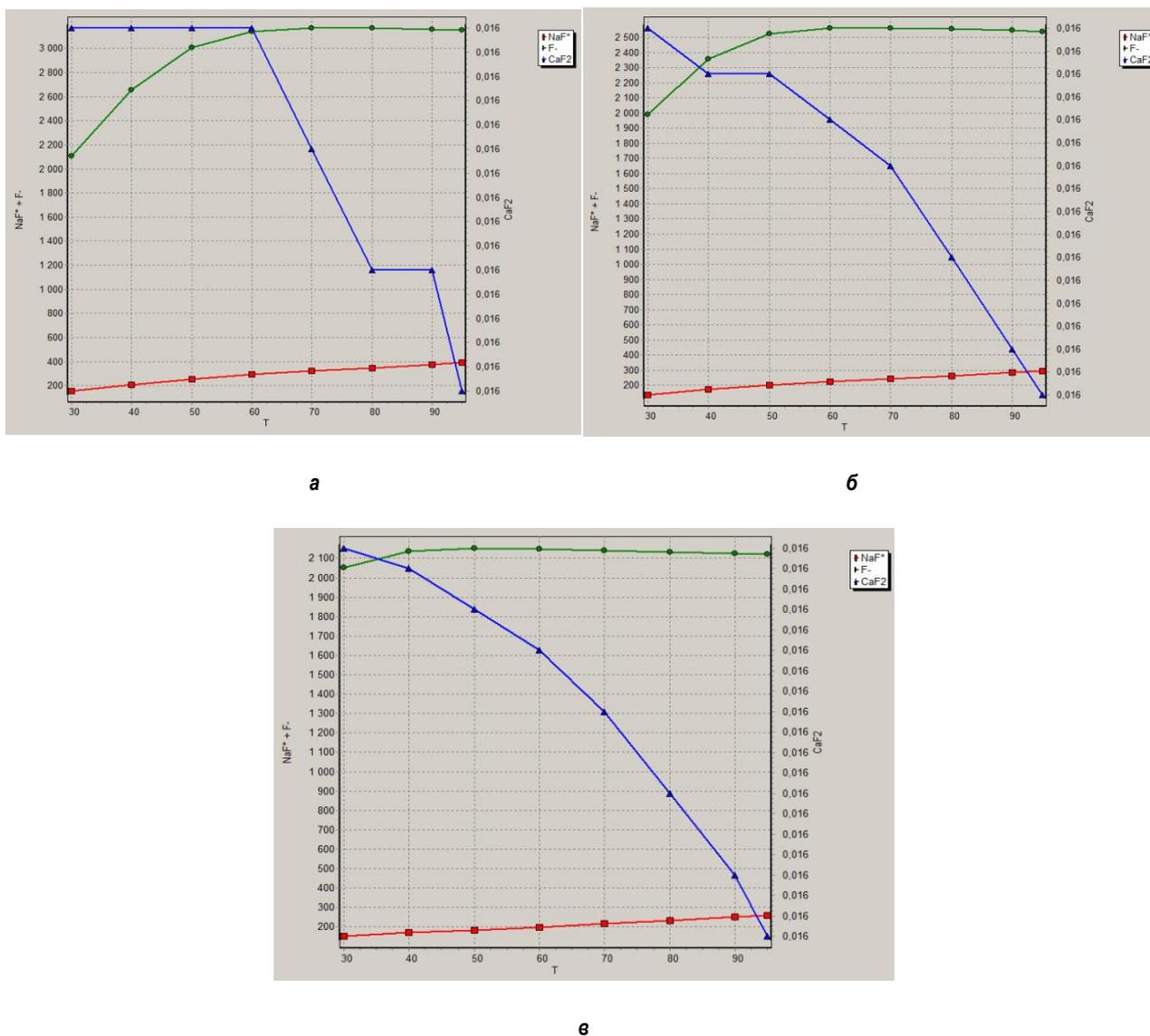


Рис. 6. Результаты моделирования по переходу фтора в раствор в составе различных компонентов при различной продолжительности и Ж : Т: а) Ж : Т = 6 : 1, б) Ж : Т = 7,5 : 1, в) Ж : Т = 9 : 1

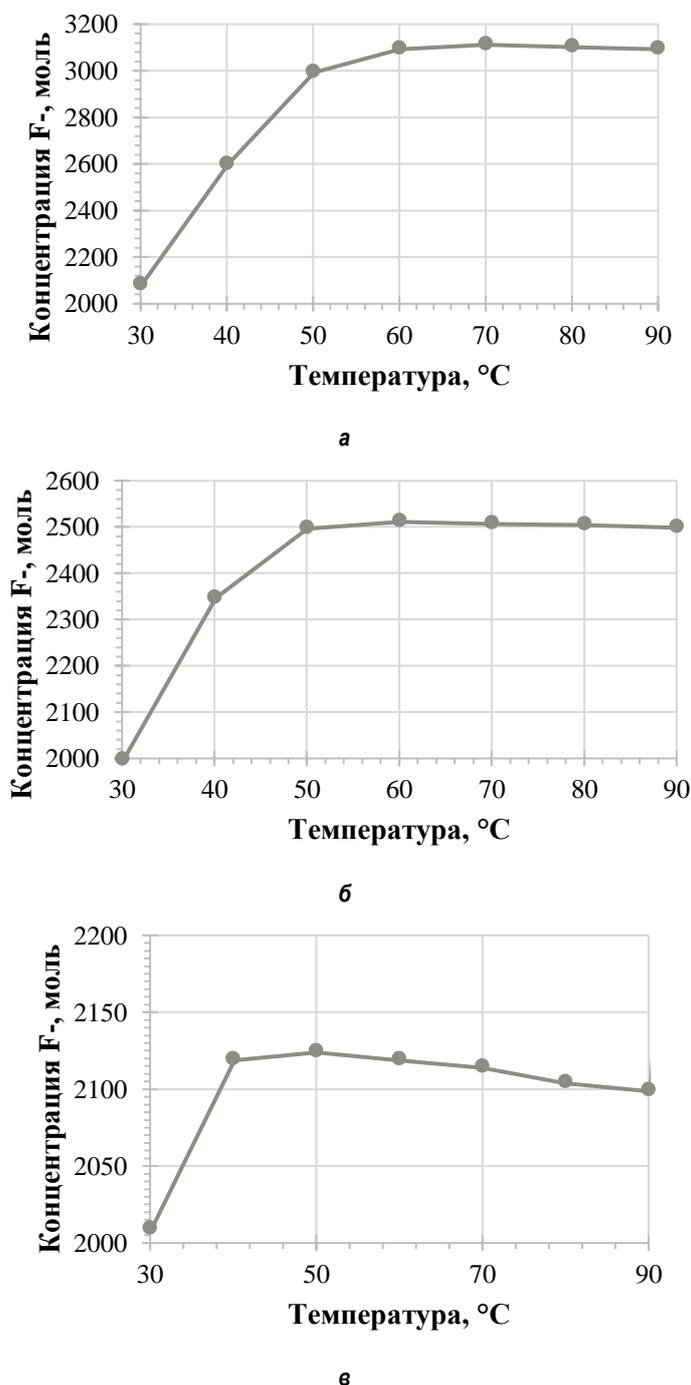


Рис. 7. Результаты моделирования по влиянию температуры на переход фтора в раствор из лежалого шлама: а) Ж : Т = 6 : 1, б) Ж : Т = 7,5 : 1, в) Ж : Т = 9 : 1

щей кристаллизации криолита. Показано, что на переход фтора в раствор до достижения концентрации, необходимой для последующей кристаллизации криолита. Показано, что в раствор переходит фтор из криолита, хиолита, фторидов кальция, магния. При построении модели процесса термодинамические свойства компонентов системы были приняты из встроенных в данный программный пакет баз данных: g_janaf.DB, g_Yokokawa.DB,

g_Reid.DB, s_RobieHemingway.DB, s_sprons98.DB. В сформированной математической модели было рассмотрено постепенное вступление компонентов техногенного сырья во взаимодействие с растворителем.

На практике необходимо уточнить оптимальные параметры выщелачивания фтора в раствор при щелочной обработке пробы лежалого шлама.

Список источников

1. Grjotheim K., Kvande H. Introduction to aluminium electrolysis. Düsseldorf: Aluminium-Verlag, 1993. 260 p.
2. Гринберг И. С., Терентьев В. Г., Чалых В. И., Черных А. Е. Электрометаллургия алюминия. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2009. 350 с.
3. Янко Э. А. Аноды алюминиевых электролизеров. М.: Руда и металлы, 2001. 670 с.
4. Zhao X., Ma L. Hazardous waste treatment for spent pot liner // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 108. P. 042023.549. Available from: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/108/4/042023> (10.07.2022).
5. Зенкин Е. Ю., Гавриленко А. А., Немчинова Н. В. О переработке отходов производства первичного алюминия ОАО «РУСАЛ Братск» // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 3. С. 123–132.
6. Nemchinova N. V., Barauskas A. E., Tyutrin A. A., Vologin V. S. Processing Finely Dispersed Technogenic Raw Materials for Aluminum Production in Order to Extract Valuable Components // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2021. Vol. 62. P. 659-667.
7. Бурдонов А. Е., Зелинская Е. В., Немчинова Н. В., Новиков Ю. В. Переработка глиноземсодержащего шлама для использования в производстве первичного алюминия // Цветные металлы. 2022. № 8. С. 15–22.
8. Свидетельство № 2021665540, Российская Федерация, Расчет материального баланса процесса электролиза криолит-глиноземных расплавов в электролизерах с самообжигающимися анодами / Немчинова Н. В., Барausкас А. Э.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ИРНИТУ». – № 2021664780, заявл. 24.09.2021; опублик. 28.09.2021.
9. Немчинова Н. В., Тютрин А. А., Барausкас А. Э. Анализ химического состава техногенных материалов производства первичного алюминия для поиска рациональных методов их переработки // Цветные металлы. 2019. №12. С. 22–29.
10. Владимиров Л. П. Термодинамические расчеты равновесия металлургических реакций. М.: Металлургия, 1970. 528 с.
11. Карпов И. К. Физико-химическое моделирование на ЭВМ в геохимии. Новосибирск: Наука, 1981. 247 с.
12. Бычинский В. А., Королева О. Н., Ощепкова А. В., Штенберг М. В. Способ определения термодинамических свойств веществ для изучения природных и технологических процессов методами физико-химического моделирования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 5. С. 48–56.
13. Yokokawa H. Tables of thermodynamic properties of inorganic compounds // Journal of the national chemical laboratory for industry. 1988. Vol. 83. P. 27-121.
14. Robie R. A., Hemingway B. S. Thermodynamic properties of minerals and related substances of 298.15 K and 1 bar pressure and at higher temperatures // U. S. Geol. Surv. Bull. Washington, Government Printing Office. 1995. 461 p.
15. Chase M. W., Davies C. A., Downey J. R., Frurip D. J., McDonald R. A., Syveerud A. N. JANAF Thermodynamical Tables Third Edition // J. Phys. & Chem. Reference Data. 1985. Vol. 14. Iss. 1. 926 p.

Информация об авторах / Information about the Authors

Алёна Эдуардовна Барausкас,
аспирант,
Институт высоких технологий,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация,
barauskas.alena@mail.ru

Юлия Владимировна Сокольникова,
кандидат химических наук,
доцент кафедры металлургии цветных металлов,
Институт высоких технологий,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация,
начальник химико-аналитической
производственной лаборатории,
Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1А,
Российская Федерация,
jsokol1@yandex.ru

Alyona E. Barauskas,
Postgraduate Student,
Institute of High Technologies,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074,
Russian Federation,
barauskas.alena@mail.ru

Yulia V. Sokolnikova,
Cand. Sci. (Chemistry),
Associate Professor of Metallurgy of Non-Ferrous Metals
Department,
Institute of High Technologies,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074,
Russian Federation,
Head of Chemical-Analytical Production Laboratory at
Institute of Geochemistry SB RAS named after
A. P. Vinogradov
1A Favorsky St., Irkutsk 664033,
Russian Federation,
jsokol1@yandex.ru

Никита Александрович Чередников,
магистрант,
Институт высоких технологий,
Иркутский национальный
исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация;
lanserpro3@gmail.com

Nikita A. Cherednikov,
Undergraduate,
Institute of High Technologies,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074,
Russian Federation,
lanserpro3@gmail.com