УДК 66.01.094.7/661.862.522.537/666.321 *DOI 10.55421/3034-4689_2025_28_6_65*

А. А. Аслонов Н. А. Наимов, Г. Аминджони,
К. Ш. Холов, Р. С. Рафиев

АММИАЧНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ СУЛЬФАТСОДЕРЖАЩЕГО РАСТВОРА, ПОЛУЧЕННОГО ПРИ СУЛЬФАТИЗАЦИИ КАОЛИНОВЫХ ГЛИН

Ключевые слова: сульфат алюминия, каолиновая глина, месторождение «Чашма-Санг», сульфатизация, гидроксид алюминия, гидроксид железа, аммиак, сульфат аммония.

В данной статье рассмотрена технология аммиачной обработки сульфатсодержащего раствора, полученного в результате сульфатизации каолиновых глин из месторождения «Чашма-Санг», расположенного на территории Республики Таджикистан. Основной целью исследования является получение смеси гидроксидов алюминия и железа, а также извлечение сульфата аммония в качестве побочного продукта. Исследования проводились в лабораторных условиях, где детально изучено влияние температуры и продолжительности процесса аммиачной обработки на эффективность осаждения целевых продуктов. Проведённые эксперименты показали, что при температуре 85 °C и длительности процесса 30 минут степень осаждения смеси гидроксидов алюминия и железа, а также выход сульфата аммония в раствор превышают 98%. Анализ осадка выявил, что доля гидроксида алюминия ($Al(OH)_3$) составляет свыше 86%, а гидроксида железа — около 13,2%. Согласно данным рентгенофазового анализа, полученная смесь гидроксидов не характеризуется четко выраженными дифракционными пиками, что указывает на её аморфную структуру. В то же время, синтезированный сульфат аммония соответствует рефлексам минерала маскагнит ($(NH_4)_2SO_4$), что указывает на высокую степень чистоты полученного продукта. По результатам физико-химических исследований установлено, что полученный сульфат аммония соответствует требованиям стандарта ГОСТ 9097-82, предъявляемым к техническому сульфату аммония. Проведённый технико-экономический анализ подтвердил высокую эффективность и экономическую целесообразность предложенной технологии переработки, особенно с учётом того, что на каждую тонну осаждённой смеси гидроксидов алюминия и железа приходится более 2,4 тонн сульфата аммония в качестве сопутствующего продукта. Полученные результаты подтверждают целесообразность внедрения данной технологии в промышленную практику, что позволяет эффективно использовать местные ресурсы и минимизировать отходы производства.

A. A. Aslonov N. A. Naimov, G. Aminjoni,
Q. Sh. Kholov, R. S. Rafiev

AMMONIA TECHNOLOGY FOR PROCESSING SULFATE-CONTAINING SOLUTION OBTAINED DURING SULFATION OF KAOLIN CLAYS

Keywords: aluminium sulphate, kaolin clay, Chashma-Sang deposit, sulfation, aluminium hydroxide, iron hydroxide, ammonia, ammonium sulfate.

This article discusses the technology of ammonia treatment of a sulfate-containing solution obtained as a result of the sulfation of kaolin clays from the Chashma-Sang deposit located in the Republic of Tajikistan. The main objective of the study is to obtain a mixture of aluminum and iron hydroxides, as well as to extract ammonium sulfate as a by-product. The research was conducted in laboratory conditions, where the influence of temperature and duration of the ammonia treatment process on the efficiency of precipitation of the target products was studied in detail. The experiments showed that at a temperature of 85 °C and a process duration of 30 minutes, the degree of precipitation of the mixture of aluminum and iron hydroxides, as well as the yield of ammonium sulfate in the solution, exceeded 98%. Analysis of the precipitate revealed that the proportion of aluminum hydroxide ($Al(OH)_3$) is over 86%, and iron hydroxide is about 13.2%. According to X-ray phase analysis, the obtained mixture of hydroxides is not characterized by clearly defined diffraction peaks, which indicates its amorphous structure. At the same time, the synthesized ammonium sulfate corresponds to the reflexes of the mineral masagnite ($(NH_4)_2SO_4$), which indicates a high degree of purity of the product obtained. The results of physical and chemical studies have established that the obtained ammonium sulfate complies with the requirements of GOST 9097-82 for technical ammonium sulfate. The technical and economic analysis confirmed the high efficiency and economic feasibility of the proposed processing technology, especially considering that each ton of precipitated aluminum and iron hydroxide mixture yields more than 2.4 tons of ammonium sulfate as a by-product. The results obtained confirm the feasibility of introducing this technology into industrial practice, which allows for the efficient use of local resources and minimization of production waste.

Введение

Гидроксид алюминия представляет собой важнейший промежуточный продукт, используемый при производстве глинозёма, коагулирующих реагентов, криолита и фторида алюминия [1-4]. На сегодняшний день основным промышленным источником алюминия остаются бокситовые руды, переработка которых осуществляется преимущественно по технологии Байера [5]. Тем не менее, в условиях сокращения запасов высококачественного сырья возрастает необходимость разработки альтернативных подходов к получению гидроксида алюминия из низкосортных, но широко распространённых глинозёмсодержащих материалов [6-11].

На территории Республики Таджикистан выявлены и изучены месторождения глинозёмсодержащего сырья невысокого качества,

обладающие промышленным потенциалом. К ним относятся каолинитсодержащие глины Зиддинской и Чашма-Сангской месторождений, мусковит-ставролитсодержащие сланцы района «Курговад», нефелиновые сиениты «Турпи» и другие [12, 13]. Одним из перспективных направлений переработки таких материалов является сернокислотное разложение и осаждение гидроксида алюминия из раствора сульфата алюминия путём взаимодействия с гидроксидом аммония. Реакция протекает с образованием сульфата аммония как побочного продукта, что позволяет организовать безотходную переработку:

$$Al_2(SO_4)_3 + 6NH_4OH \rightarrow 2Al(OH)_3 + 3(NH_4)_2SO_4 \quad (1)$$

В зависимости от параметров процесса – температуры, pH среды, концентрации реагентов и способа введения аммиачной воды – возможно получение различных полиморфных форм гидроксида алюминия [14]. Технология с применением газообразного аммиака обладает рядом преимуществ: высокая скорость реакции, чистота конечного продукта и возможность утилизации всех побочных компонентов.

Цель данного исследования заключается в разработке и анализе технологии аммиачной обработки сульфатсодержащего раствора, полученного при сульфатизации каолинитсодержащих глин Чашма-Сангского месторождения, с последующим извлечением гидроксида алюминия и побочных продуктов [15-17].

Методика исследования

В качестве исходного материала для экспериментов использовались каолиновые глины месторождения «Чашма-Санг». Данное сырьё обладает следующим химическим составом (в массовых процентах): SiO_2 – 62,1; Al_2O_3 – 20,5; Fe_2O_3 – 6,9; K_2O – 0,5; CaO – 1,8; MgO – 0,8; Na_2O – 0,6; потери при прокаливании — 6,1 [18].

Сульфатизацию глины проводили концентрированной серной кислотой при температуре 200-250 °C, в результате чего получали раствор, содержащий сульфаты алюминия и железа. После фильтрации и охлаждения раствора осуществляли его обработку газообразным аммиаком с контролем температуры и продолжительности процесса. Реакции протекают по уравнениям:

$$\mathbf{Al_2(SO_4)_{3(ж)} + 6NH_{3(г)} + 6H_2O_{(ж)} = 2Al(OH)_{3(т)} + 3(NH_4)_2SO_{4(ж)}} \quad (2)$$

$$Fe_2(SO_4)_{3(ж)} + 6NH_{3(г)} + 6H_2O_{(ж)} = 2Fe(OH)_{3(т)} + 3(NH_4)_2SO_{4(ж)} \quad (3)$$

Образовавшиеся осадки фильтровали, промывали и сушили. Идентификацию продуктов проводили с использованием рентгенофазового анализа (РФА) и химического анализа. Раствор, содержащий сульфат аммония, использовался как потенциальное азотное удобрение.

Обсуждение результатов

Проведена исследовательская работа по технологии переработки сульфатсодержащего раствора, получаемого при сульфатизации каолиновых глин, с применением аммиака в газообразной форме. Целью исследования являлось получение смеси гидроксидов Al и Fe, а также сульфата аммония. Основное внимание уделено влиянию температуры и продолжительности процесса на полноту осаждения целевых компонентов (табл. 1).

Таблица 1 – Исследование процесса переработки сульфатсодержащего раствора аммиачным газом

Table 1 – Study of sulphate-containing solution processing with ammonia gas

№	Параметры		Степень извлечения, масс. %	
	t, °C	t, мин.	Смеси $Al(OH)_3$ и $Fe(OH)_3$	$(NH_4)_2SO_4$
1	25	10	97,84	97,78
2	45		97,89	97,83
3	65		97,92	97,89
4	85		97,98	97,96
5	85	20	98,47	98,25
6		30	98,54	98,29
7		40	98,61	98,35

Как видно из таблицы 1, при повышении температуры выход гидроксидов железа, алюминия и сульфата аммония изменяется незначительно. Однако при увеличении продолжительности процесса с 10 до 30 минут выход гидроксидов железа и алюминия увеличился с 97,74% до 98,54%, а выход сульфата аммония – с 97,78% до 98,29%. Следует отметить, что для удаления сульфата аммония из смеси гидроксидов перед проведением процесса фильтрации пульпа нагревается до температуры 85 °C и отделяется с помощью вакуум-фильтрующего устройства.

Таким образом, изучена зависимость скорости фильтрации и степени чистоты смеси гидроксидов от температуры и соотношения между твердой и жидкой фазами (Т:Ж) при промывке пульпы с использованием обычной лабораторной фильтровальной воронки и вакуум-фильтровального устройства. В таблице 2 приведены результаты зависимости скорости фильтрации и чистоты смеси гидроксидов от температуры при соотношении Т:Ж – 1:4:6 с использованием обычной лабораторной фильтровальной воронки.

Таблица 2 – Скорость фильтрации и чистота смеси гидроксидов в зависимости от температуры с использованием лабораторной фильтровальной воронки

Table 2 – Filtration rate and purity of the hydroxide mixture as a function of temperature using a conventional laboratory filter funnel

№	Условия фильтрации		Выход продуктов, масс. %		
	t, °C	Скорость фильтрации, мин.	Смеси гидроксидов	Остаточный $(NH_4)_2SO_4$ в твердой части	Сульфат аммония
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Соотношения воды для промывки: Т:Ж – 1:4					
1	25	80	97,84	16,55	81,23
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
2	45	71	97,91	15,64	82,25
3	65	44	97,98	10,95	87,51
4	85	32	98,06	7,43	90,69
Соотношения воды для промывки: Т:Ж – 1:6					
5	25	110	97,89	2,94	97,59
6	45	91	98,03	1,68	98,11
7	65	76	98,13	0,83	98,24
8	85	50	98,27	0,13	98,46

Как видно из таблицы 2, при повышении температуры пульпы и воды для промывки с 25 до 85 °С при соотношении Т:Ж – 1:4 время фильтрации сокращается с 80 до 32 минут, а количество остаточного сульфата аммония в составе смеси гидроксидов уменьшается с 16,55 до 7,43%. В то же время выход сульфата аммония, который переходит в жидкую фазу, значительно увеличивается.

При изменении соотношения Т:Ж с 1:4 до 1:6 и повышении температуры с 25 до 85 °С (таблица 2), количество сульфата аммония в осадке существенно уменьшается, а выход сульфата аммония и гидроксидов железа и алюминия составляет более 98%.

В отличие от экспериментов с обычной лабораторной фильтровальной воронкой, были проведены исследования с использованием вакуум-фильтровального устройства, результат которых приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Скорость фильтрации и чистота смеси гидроксидов в зависимости от температуры с использованием вакуум-фильтровального устройства

Table 3 – Filtration rate and purity of the hydroxide mixture as a function of temperature using a vacuum filter device

№	Условия фильтрации		Выход продуктов, масс. %		
	t, °C	Скорость фильтрации, мин.	Смеси гидроксидов	Остаточный $(NH_4)_2SO_4$ в твердой части	Сульфат аммония
Соотношения воды для промывки: Т:Ж – 1:4					
1	25	20	97,92	13,11	84,27
2	45	15	98,15	9,19	87,81
3	65	12	98,24	5,92	92,14
4	85	7	98,57	2,89	95,39
Соотношения воды для промывки: Т:Ж – 1:6					
5	25	28	97,96	0,11	97,24
6	45	23	98,29	0,06	97,76
7	65	19	98,46	0,01	97,89
8	85	13	99,12	-	98,65

Из таблицы 3 следует, что при применении вакуумного фильтровального устройства и повышении температуры пульпы и воды для промывки с 25 до 85 °С при соотношении Т:Ж – 1:4 время фильтрации снизилась с 20 до 7 минут, а остаточное содержание сульфата аммония в смеси гидроксидов уменьшилось с 13,11% до 2,89%. Одновременно степень разделения сульфата аммония возросла с 84,27% до 95,39%.

При изменении соотношения Т:Ж с 1:4 до 1:6 и увеличении температуры с 25 до 85 °С (таблица 3) сульфат аммония в осадке практически исчез, при этом выход сульфата аммония и гидроксидов Fe и Al составил более 98%.

Таким образом, было установлено, что для переработки 100 мл сульфатсодержащего раствора расходуется 2,54 л/мин газообразного аммиака (по стехиометрическому расчету), а продолжительность процесса составляет 15 минут. На этой основе степень извлечения смеси гидроксидов алюминия и железа составляет более 99%, а степень разделения сульфата аммония как побочного продукта – более 98%.

После проведения экспериментов взята проба из твердой фазы, которая была высушена и подвергнута химическому анализу. Результаты последнего представлены в виде диаграммы на рисунке 1.

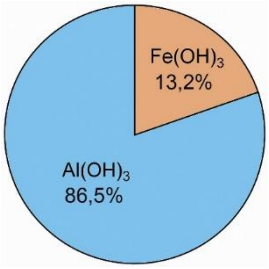

Рис. 1 – Химический состав смеси $Al(OH)_3$ и $Fe(OH)_3$

Fig. 1 – Chemical composition of the $Al(OH)_3$ and $Fe(OH)_3$ mixture

С целью подтверждения протекания данного технологического процесса был проведён рентгенофазовый анализ смеси гидроксидов. Установлено, что полученный образец относится к аморфным гидроксидам алюминия и железа, поскольку на рентгенограмме не наблюдается никаких дифракционных линий. В представленной технологии ключевым этапом являлось получение смеси гидроксидов алюминия и железа для последующего исследования, в связи с чем контроль за формированием их кристаллических фаз не рассматривался в числе приоритетных задач.

В ходе химического анализа упаренной и высушенной жидкой фазы было установлено, что степень чистоты полученного сульфата аммония составляет 99%. Содержание его компонентного состава приведено в таблице 4 в сравнении с техническим сульфатом аммония.

Как видно из таблицы 4, полученный сульфат аммония соответствует требованиям ГОСТ 9097-82.

Для подтверждения результатов химического анализа упаренный соль подверглась рентгенофазовому анализу (рисунок 2).

Наблюдается, что данный образец (рис. 2) относится к минералу маскангит (его номер в картотеке PDF 40-660).

Таблица 4 – Сравнительный анализ химического состава исследуемого и стандартного технического сульфата аммония

Table 4 – Comparative analysis of the chemical composition of the studied and standard technical ammonium sulfate

Показатели	ГОСТ 9097-82	**Полученный аммонийный сульфат.**
Внешний вид	Кристаллы белого или прозрачного цвета.	Кристаллы белого цвета с желтоватым оттенком.
Массовая доля:		
N, %, ≥	21	**20,9**
воды, %, ≤	0,2	**0,11**
свободной H_2SO_4, %, ≤	0,03	**0,01**
серы, %, ≥	24	**23,9**
нераст. ост.%, ≤	0,02	**0,01**

Таблица 5 – Технико-экономический расчёт процесса получения 1 тонны смеси гидроксидов Al и Fe

Table 5 – Technical and economic calculation of the process of obtaining 1 tonne of Al and Fe hydroxide mixture

№	Категории затрат	Ед. измер.	Расходы на 1 т	Цена на 1 т продукции	
				сомони	доллар
I. Сырьевые материалы					
1	Жидкий коагулянт	$м^3$	15,74	3564,4	324
2	Газообразный аммиак (7000 сомони/т)	т	0,679	4753	432
II. Электроэнергия					
3	Электроэнергия	кВт/ч	52,28	10,45	0,95
III. Трудовые затраты					
4	Зарплата	-	-	73	6,63
5	Социальные отчисления (25%)			18,25	1,65
IV. Накладные и сопутствующие расходы					
6	Накладные расходы (5%)	-	-	3,65	0,33
7	Амортизация (0,08%)			12,1	1,1
8	Прочие расходы (5%)			3,65	0,33
9	**Итого: Себестоимость**	т	-	**8438,7**	**767,1**
10	Мировая цена			6600	600
11	Рентабельность			-1838,7	-167,1
V. Побочный продукт					
12	Количество сульфата аммония, образовавшегося в виде побочного продукта, составляет 2,478 т (5000*2,478 = 12 390 сомони / 1126,3 $)				

На основе ранее проведённых исследований были выполнены технико-экономические расчёты процесса сульфатизации глины месторождения «Чашма-Санг» [22], а также реализованы технико-экономические расчёты технологии переработки сульфатсодержащего раствора с применением газообразного аммиака. В таблице 5 приведены результаты расчётов для получения 1 тонны смеси гидроксидов алюминия и железа из раствора сульфатов алюминия и железа.

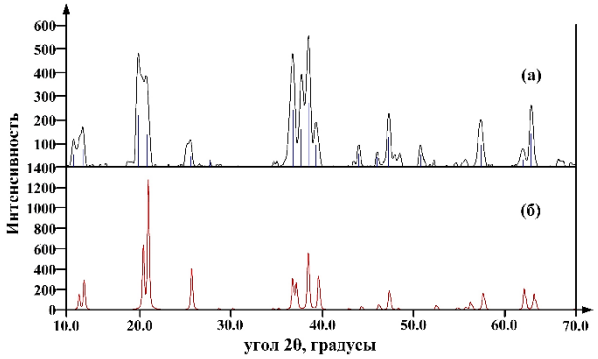

Рис. 2 – Рентгенограмма анализируемого образца (а) и эталона - минерала маскагнит $(NH_4)_2SO_4$ (б)

Fig. 2 – X-ray diffraction of the analysed sample (a) and the reference mineral mascagnite $(NH_4)_2SO_4$ (b)

Как видно из табл. 5 при расчете себестоимости только смеси гидроксидов алюминия и железа убыток технологии составляет 1838,7 сомони за 1 тонну. Однако наряду с производства 1 тонны смеси, образуется 2,478 т сульфат аммония цена которого на мировом ринке составляет примерно 5000 сомони. Таким образом рентабельность технологии при производстве 1 т смеси гидроксидов составляет 10 551,3 сомони (12390-1838,7 = 10 551,3 сомони).

Заключение

Применение газообразного аммиака в технологии осаждения гидроксидов из сульфатсодержащих растворов является более экологически безопасным и экономически целесообразным по сравнению с использованием гидроксида аммония. Представленная технология позволяет эффективно перерабатывать смеси сульфатов алюминия и железа с получением ценных продуктов – смеси гидроксидов алюминия и железа, а также сульфата аммония.

Полученная смесь гидроксидов может быть использована в качестве сырья для производства алюмо-железистых коагулянтов по традиционной технологии, а также для получения криолита, фторида алюминия или глинозёма по Байеровскому методу. Побочный продукт – сульфат аммония – представляет собой востребованное азотсодержащее минеральное удобрение, что повышает общую эффективность и рентабельность предлагаемой технологии.

Литература

1. М. Е. Позин. *Технология минеральных солей (удобрений, пестицидов, промышленных солей, окислов и кислот). ч. 2*, Изд. 4-е. испр. Л. Изд. «Химия», 1974, 768с.
2. С. Ю. Гузь, Р. Г. Барановская. *Производство криолита, фтористого алюминия и фтористого натрия.* М.: Металлургия, 1964, 238 с.
3. Bingbing Wan, Wenfang Li, Wanting Sun, Fangfang Liu, Bin Chen, Shiyao Xu, Weiping Chen, Aihua Yi. *Materials*, 2020, **13**, 3871, pp. 1-19. DOI:https://doi.org/10.3390/ma13173871.
4. Х. Сафиев, Н. А. Наимов, Д. Р. Рузиев, И. Ш. Ахмадшоев, А. М. Джуракулов, А. Муродиён, Н. В. Немчинова. *iPolytech Journal*, 2022, **26** (2), с. 348-356. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-348-356.
5. А. И. Сушков, И. А. Троицкий. *Металлургия алюминия*. М.: «Металлургия», 1965. с. 421-425.
6. У. М. Мирсаидов. *Переработка алюмосиликатных руд Таджикистана спекательными методами*. Душанбе, «Дониш», 2021, 76 с.
7. Ю. А. Лайнер. *Комплексная переработка алюминийсодержащего сырья кислотными способами*. – М.: Наука, 1982, 208 с.
8. А. К. Запольский. *Сернокислотная переработка высококремнистого алюминиевого сырья*. Киев: Наукова думка, 1981, 208 с.
9. У. М. Мирсаидов, Д. Х. Мирзоев, Х. Э. Бобоев. *Комплексная переработка аргиллитов и каолиновых глин Таджикистана*. Душанбе, «Дониш», 2016, 92 с.
10. Н. А. Наимов, Г. Аминджони, Дж. Р. Рузиев, Р. С. Рафиев, Х. Э. Бобоев, Х. Сафиев. *Доклады Академии наук Республики Таджикистан*, 2018, т. **61**, №2, с.194-199.
11. И. В. Логинова, А. А. Шопперт, Д. А. Рогожников, А. В. Кырчиков. *Производство глинозема и экономические расчеты в цветной металлургии*. Екатеринбург: Издательство УМЦ УПИ, 2016, 253 с.
12. З. Ё. Ёров, Ш. О. Кабиров, А. Муродиён, Н. М. Сироджев. *Минерально – сырьевая база химико – металлургической промышленности Таджкистана*. Душанбе, 2012, Отп. в «Мега Басым», Стамбул, Турция, 416с.
13. Н. А. Наимов, Дж. Р. Рузиев, Х. Э. Бобоев, А. Х. Сафиев, Х. Сафиев. *Доклады Академии наук Республики Таджикистан*, 2017, т. **60**, №7-8, с.356-361.
14. Barsha Dash, B. C. Tripathy, I. N. Bhattacharya, T. Subbaiah. *International Journal of Metallurgical Engineering*. 2012, **1(5)**: 78-82. DOI: 10.5923/j.ijmee.20120105.02.
15. Н. А. Наимов, Х. Сафиев, У. Мирсаидов, Н. Х. Раджабзода, Дж. Р. Рузиев. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*, 2024, Т. **67**, Вып. 2, с. 67–73. DOI: https://doi.org/10.6060/ivkkt.20246702.6873.
16. Н. А. Наимов, У. М. Мирсаидов, Г. Аминджони, А. А. Аслонов. *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки.* 2024. № **4** (224). С. 130-136. http://dx.doi.org/10.17213/1560-3644-2024-4-130-136.
17. Н. А. Наимов, Ф. Д. Иброхимзода, Р. С. Рафиев, С. М. Шокаримов. *Вестник педагогического университета, серия естественных наук*, 2024, №1 (21), С. 40-47.
18. Н. А. Наимов, Х. Сафиев, У. Мирсаидов, А. Муродиён, Г. Аминджони, С. А. Сатторов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2024, № 6 (117), С. 88-102. EDN: ACLYGP.
19. Н. А. Наимов, У. М. Мирсаидов, Г. Аминджони, К. Ш. Холов. *Вестник технологического университета.* 2024. **Т.27**, №11, стр. 84-88, DOI 10.55421/1998-7072_2024_27_11_84.
20. Н. А. Наимов, У. Мирсаидов, Х. А. Мирпочаев, А. А. Аслонов, С. М. Шокаримов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Естественные науки»*, 2025, № 1 (118), С. 157-171. EDN: HGJGYA.
21. Н. А. Наимов, К. Ш. Холов, Г. Аминджони, Х. Сафиев, У. М. Мирсаидов. *Доклады Национальной академии наук Таджикистана*, Том **67**, №5-6, 2024, стр. 286-293.

22. Н. А. Наимов, Н. Х. Раджабзода, У. М. Мирсаидов. *Вестник Таджикского национального университета, Серия естественных наук,* 2024, №3, стр. 173-182.

References

1. M. E. Pozin. *Technology of mineral salts (fertilizers, pesticides, industrial salts, oxides and acids). Part 2, 4th ed., rev.* L. Publishing house «Khimiya», 1974, 768 p.
2. S. Yu. Guz, R. G. Baranovskaya. *Production of cryolite, aluminum fluoride and sodium fluoride.* M.: Metallurgiya, 1964, 238 p.
3. Bingbing Wan, Wenfang Li, Wanting Sun, Fangfang Liu, Bin Chen, Shiyao Xu, Weiping Chen, Aihua Yi. *Materials*, 2020, **13**, 3871, pp. 1-19. DOI:https://doi.org/10.3390/ma13173871
4. Kh. Safiev, N. A. Naimov, J. R. Ruziev, I. Sh. Akhmadshoev, A. M. Juraqulov, A. Murodiyon, N. V. Nemchinova. *iPolytech Journal*. 2022;26(2):348-356. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-348-356
5. A .I. Sushkov, I. A. Troitsky. *Aluminum metallurgy.* M.: Metallurgiya, 1965, pp. 421-425.
6. U. M. Mirsaidov. *Processing of aluminosilicate ores of Tajikistan by sintering methods.* Dushanbe: Donish, 2021, 76 p.
7. Yu. A. Lainer. *Complex processing of aluminum-containing raw materials by acid methods.* M.: Nauka, 1982, 208 p.
8. A. K. Zapolsky. *Sulfuric acid processing of high-silica aluminum raw materials.* Kyiv: Naukova Dumka, 1981, 208 p.
9. U. M. Mirsaidov, D. Kh. Mirzoev, Kh. E. Boboev. *Complex processing of argillites and kaolinite clays of Tajikistan.* Dushanbe: Donish, 2016, 92 p.
10. N. A. Naimov, G. Aminjoni, J. R. Ruziev, R. S. Rafiev, Kh. E. Boboev, H. Safiev. *Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan*, 2018, vol. **61**, no. 2, pp. 194-199.
11. Loginova I.V., Shoppert A.A., Rogozhnikov D.A., Kyrchikov A.V. Production of alumina and economic calculations in non-ferrous metallurgy. Textbook. Yekaterinburg: UMC UPI Publishing House, 2016, 253 p.
12. Z. Yo. Yorov, Sh. O. Kabirov, A. Murodiyon, N. M. Sirodjev. *Mineral resource base of the chemical and metallurgical industry of Tajikistan.* Dushanbe, 2012, printed by "Mega Basym", Istanbul, Turkey, 416 p.
13. N. A. Naimov, J. R. Ruziev, Kh. E. Boboev, A. H. Safiev, H. Safiev. *Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan*, 2017, vol. **60**, N. 7-8, pp. 356-361.
14. Barsha Dash, B. C. Tripathy, I. N. Bhattacharya, T. Subbaiah. *International Journal of Metallurgical Engineering*. 2012, **1(5)**: 78-82. DOI: 10.5923/j.ijmee.20120105.02.
15. N. A. Naimov, H. Safiev, U. Mirsaidov, N. H. Rajabzoda, J. R. Ruziev. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. **67.** N2. P. 67-73. DOI: https://doi.org/10.6060/ivkkt.20246702.6873
16. N. A. Naimov, U. M. Mirsaidov, G. Aminjoni, A. A. Aslonov. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Techn. Nauki. Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences.* 2024; (4): pp. 130-136. http://dx.doi.org/10.17213/1560-3644-2024-4-130-136.
17. N. A. Naimov, F. D. Ibrohimzoda, R. S. Rafiev, S. M. Shokarimov. *Herald of the Pedagogical University, series of natural sciences*, 2024, No. 1 (21), pp. 40-47.
18. N. A. Naimov, U. M. Mirsaidov, A. Murodiyon, et al. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences,* 2024, no. 6 (117), pp. 88-102. EDN: ACLYGP
19. N. A. Naimov, U. M. Mirsaidov, G. Aminjoni, K. Sh. Kholov. N. A. Naimov, U. M. Mirsaidov, G. Aminjoni, Q. Sh. Kholov. *Herald of Technological University.* 2024. Vol. **27**, No. 11. P. 84-88. DOI 10.55421/1998-7072_2024_27_11_84. – EDN EIUGEA.
20. N. A. Naimov, U. Mirsaidov, Kh. A. Mirpochaev, A. A. Aslonov, S. M. Shokarimov. *Herald of Bauman Moscow State Technical University. Series "Natural Sciences"*, 2025, No. 1 (118), pp. 157-171. EDN: HGJGYA.
21. N. A. Naimov, K. Sh. Kholov, G. Aminjoni, Kh. Safiev, U. M. Mirsaidov. *Reports of the National Academy of Sciences of Tajikistan*, Vol. **67,** No. 5-6, 2024, pp. 286-293.
22. N. A. Naimov, N. Kh. Rajabzoda, U. M. Mirsaidov. *Bulletin of the Tajik National University, Series of natural sciences*, 2024, No. 3, pp. 173-182.

© **А. А. Аслонов** – докторант PhD по специальности «Химическая технология неорганических веществ» факультета Химии, кафедра Прикладной химии, Таджикский национальный университет (ТНУ), Душанбе, Таджикистан, aslonov04061997@mail.ru; **Н. А. Наимов** – к.т.н., директор ГУ «Научно-исследовательский институт металлургии» ОАО «Таджикская алюминиевая компания» (ГУ «НИИМ» ОАО «ТАЛКО»), Душанбе, Таджикистан, nosser2016@outlook.com; **Г. Аминджони** – к.т.н., заведующий лабораторией Переработки местного глинозем-, фтор- и углеродсодержащего сырья ГУ «НИИМ» ОАО «ТАЛКО», boboev-aminjon@mail.ru; **К. Ш. Холов** – инженер-технолог лаборатории Переработки местного глинозем-, фтор- и углеродсодержащего сырья ГУ «НИИМ» ОАО «ТАЛКО», inmet.talco@mail.ru; **Р. С. Рафиев** – к.х.н., заведующий кафедрой Прикладной химии Химического факультета ТНУ, rustam.rafiev@mail.ru.

© **A. A. Aslonov** – PhD-student in "Chemical Technology of Inorganic Substances", Faculty of Chemistry, Department of Applied Chemistry, Tajik National University (TNU), Dushanbe, Tajikistan, aslonov04061997@mail.ru; **N.A. Naimov** – PhD (Technical Sci.), Director of State Institution «Research Institute of Metallurgy» JSC «Tajik Aluminium Company» (SI "RIOM" JSC "TALCO"), Dushanbe, Tajikistan, nosser2016@outlook.com; **G. Aminjoni** – PhD (Technical Sci.), Head of the Laboratory of Processing of Local Alumina, Fluorine and Carbon-containing Raw Materials of SI "RIOM" JSC "TALCO", boboev-aminjon@mail.ru; **Q. Sh. Kholov** – Process Engineer of the Laboratory of Processing of Local Alumina, Fluorine and Carbon-containing Raw Materials of SI "RIOM" JSC "TALCO", inmet.talco@mail.ru; **R. S. Rafiev** – PhD (Technical Sci.), Head of the Department of Applied Chemistry, Faculty of Chemistry, TNU, rustam.rafiev@mail.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию –12.05.25.
Дата принятия рукописи в печать – 03.06.25.