

Научная статья  
УДК 661.634.222.254  
doi:10.37614/2949-1215.2025.16.4.016

## ПОЛУЧЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ГЕКСАФТОРСИЛИКАТА НАТРИЯ ИЗ ОТХОДА ОЧИСТКИ ЭКСТРАКЦИОННОЙ ФОСФОРНОЙ КИСЛОТЫ

**Марк Сергеевич Мохорт<sup>1</sup>, Олег Борисович Дормешкин<sup>2</sup>, Александр Александрович Бышик<sup>3</sup>,  
Андрей Николаевич Гаврилюк<sup>4</sup>**

<sup>1–4</sup>Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>1</sup>markmohort@gmail.com

<sup>2</sup>dormeshkin@yandex.ru

<sup>3</sup>fxguru29@gmail.com

<sup>4</sup>gavriluk\_andrew@mail.ru

### Аннотация

Проведен комплекс исследований о возможности переработки гексафторкремниевого отхода, образующегося в процессе очистки экстракционной фосфорной кислоты химическим методом с выделением примесей в составе малорастворимых кремнефторидов щелочных металлов. с получением товарного продукта — технического гексафторсиликата натрия, методом перекристаллизации.

### Ключевые слова:

гексафторсиликат натрия, отход, переработка, технический продукт, экстракционная фосфорная кислота

### Финансирование:

работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований «Химические процессы, реагенты и технологии, биорегуляторы и биоорганическая химия» (задание 2.1.9, № 20240816).

### Для цитирования:

Мохорт М. С., Дормешкин О. Б., Бышик А. А., Гаврилюк А. Н. Получение технического гексафторсиликата натрия из отхода очистки экстракционной фосфорной кислоты // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2025. Т. 16, № 4. С. 90–94. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.4.016.

Original article

## PRODUCTION OF TECHNICAL SODIUM HEXAFLUOROSILICATE FROM WASTE FROM WET PHOSPHORIC ACID PURIFICATION

**Mark S. Mokhart<sup>1</sup>, Oleg B. Dormeshkin<sup>2</sup>, Alexander A. Byshyk<sup>3</sup>, Andrei N. Hauryliuk<sup>4</sup>**

<sup>1–4</sup>Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus

<sup>1</sup>markmohort@gmail.com

<sup>2</sup>dormeshkin@yandex.ru

<sup>3</sup>fxguru29@gmail.com

<sup>4</sup>gavriluk\_andrew@mail.ru

### Abstract

A set of studies has been conducted on the possibility of processing hexafluorosilicic waste generated during the purification of wet-process phosphoric acid by a chemical method with the release of impurities in the composition of poorly soluble alkali metal fluorosilicates. with the production of a commercial product — technical sodium hexafluorosilicate, by the recrystallization method.

### Keywords:

sodium hexafluorosilicate, waste, recycling, technical product, wet-process phosphoric acid

### Funding:

the work was carried out within the framework of the State Scientific Research Program “Chemical Processes, Reagents and Technologies, Bioregulators and Bioorganic Chemistry” (task 2.1.9, No. 20240816).

### For citation:

Mokhart M. S., Dormeshkin O. B., Byshyk A. A., Hauryliuk A. N. Production of technical sodium hexafluorosilicate from waste from wet-process phosphoric acid purification // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2025. Vol. 16, No. 4. P. 90–94. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.4.016.

## Введение

Технология комплексной очистки экстракционной фосфорной кислоты (ЭФК) [1] предполагает перевод основного количества фтора в твердую фазу, что связано с образованием техногенного отхода, основным компонентом которого является гексафторсиликат натрия. С целью обеспечения комплексной переработки сырья и организации малоотходной технологии на основе принципов «зеленой химии», позволяющей максимально использовать исходные реагенты, снизить количество отходов и устранить их антропогенное воздействие на окружающую среду необходимо разработать способы переработки указанного отхода с получением продуктов технического назначения. Актуальность данной задачи обусловлена в том числе негативным влиянием гексафторсиликата натрия на окружающую среду.

## Результаты исследований

Образующиеся на стадии очистки ЭФК методом осаждения осадки, являющиеся отходом производства, состав которых представлен в табл. 1, в зависимости от вида очищаемой кислоты, содержат в своем составе 29,74–38,64 мас. % (% — далее и по тексту) фторид-ионов, что составляет 45,55–60,46 % в пересчете на  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ . Однако осадки не могут рассматриваться в качестве товарного продукта, поскольку, согласно действующим нормативным документам, содержание основного вещества в товарном кремнефториде натрия составляет от 80 (согласно ТУ 2621-010-69886968-2013) до 95 % (согласно ТУ 113-08-587-87).

Известно, что одним из эффективных способов очистки неорганических солей от примесей является использование метода перекристаллизации, предполагающей промежуточное выделение в твердую фазу основного количества примеси на стадии растворения при повышенных температурах с последующим охлаждением и выделением целевого продукта. Основной примесью в составе образующегося в процессе очистки ЭФК отхода является оксид кремния. Анализ литературных данных растворимости гексафторсиликата натрия в воде [2] показывает существенное возрастание его растворимости в интервале от 0 до 100 °С с 4,35 до 24,50 г/л, тогда как растворимость оксида кремния в этом интервале практически не изменяется.

Таблица 1

Химический состав осадков, образующихся на стадии очистки ЭФК

Состав	Содержание, %		
	ЭФК (Марокко)	УЭФК (Марокко)	УЭФК (Кировск)
$\text{P}_2\text{O}_5$	5,497	7,824	6,241
F	38,64	29,74	32,76
CaO	2,916	3,124	3,104
MgO	0,427	0,466	0,258
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	1,329	0,641	1,444
$\text{Al}_2\text{O}_3$	0,586	0,548	0,489
$\text{K}_2\text{O}$	0,029	0,016	0,041
$\text{Na}_2\text{O}$	21,02	16,18	17,82
$\text{SO}_4$	0,256	0,541	0,553
$\text{SiO}_2$	29,30	40,92	37,29

В связи с этим был выполнен комплекс исследований о возможности переработки гексафторкремниевого отхода с получением товарного продукта — гексафторсиликата натрия — методом перекристаллизации.

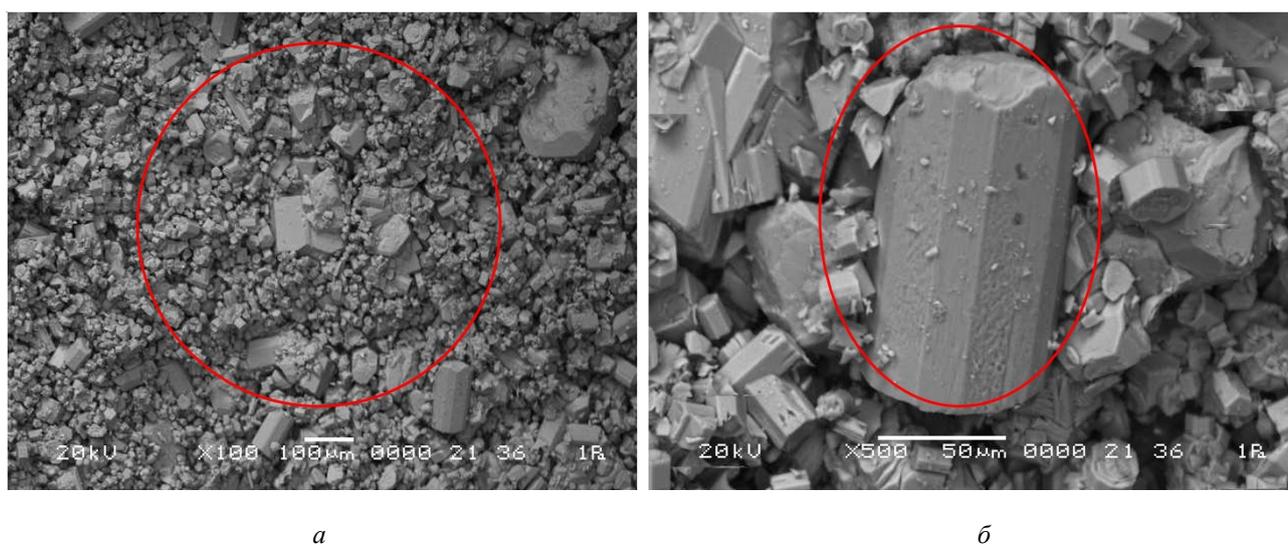
Процесс перекристаллизации гексафторкремниевого отхода включает следующие стадии:

- изотермическое растворение отхода при температуре 80 °С;
- горячую фильтрацию суспензии с промежуточным выделением примесей;
- охлаждение и политермическую кристаллизацию  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  в интервале от 80 до 20 °С;
- выделение целевого продукта методом фильтрации с рециркуляцией маточника на стадию растворения.

В процессе выполнения исследований проводили отбор жидкой и твердой фаз на отдельных стадиях и их последующий химический анализ. Кроме того, твердую фазу, отделяемую на стадии

горячего фильтрования, а также полученный целевой продукт анализировали методами химического и физико-химического анализа (электронной микроскопии, рентенофазовым и энергодисперсионным рентгенофлуоресцентным методами анализа).

Результаты электронной микроскопии целевого продукта показали, что в процессе кристаллизации гексафторсиликата натрия наблюдается осаждение полидисперсных по составу кристаллов в виде отдельных, неизометричных, призматических монокристаллов с предположительно гексагональной сингонией размером до 170 мкм (рис. 1а, б). Наличие сростков кристаллов в виде двойников подтверждают политермичность процесса. При сравнении микрофотографий, полученных в ходе исследования кристаллов с известными литературными данными [3], внешний вид образующихся кристаллов полностью идентичен кристаллам гексафторсиликата натрия.



**Рис. 1.** Микрофотографии целевого продукта — кремнефторида натрия после перекристаллизации.  
Кратность увеличения: *a* — 100; *б* — 500

С целью идентификации качественного состава образующейся кристаллической фазы был выполнен энергодисперсионный рентгенофлуоресцентный анализ как ее усредненного по площади состава (рис. 1а), так и состава отдельного монокристалла (рис. 1б). Анализ полученных спектров позволяет сделать вывод, что элементный состав кристаллов идентичен для всех кристаллов, входящих в состав твердой фазы, и представлен гексафторсиликатом натрия.

Результаты рентгенофазового анализа подтверждают данный вывод. Как видно на рентгенограмме производного осадка все пики как интенсивности, так и значений основных межплоскостных расстояний полностью соответствуют гексафторсиликату натрия (рис. 2).

Отделяемый на промежуточной стадии горячего фильтрования нерастворимый осадок, исследовали методами электронной микроскопии и рентгенофазового анализа. Анализ микрофотографий (рис. 3) позволяет сделать вывод о полидисперсности осадка, наличии частиц аморфного диоксида кремния с раковистым изломом, входящего в состав перерабатываемого отхода, и отдельных, мелких, неизометричных, призматических монокристаллов гексагональной сингонии гексафторсиликата натрия размером до 13 мкм, образующихся при сушке нерастворимого осадка за счет кристаллизации из жидкой фазы, содержащейся в составе отделяемого при фильтрации влажного осадка.

С целью идентификации качественного состава частиц, входящих в состав нерастворимого осадка, был выполнен энергодисперсионный рентгенофлуоресцентный анализ. Анализ полученных данных показывает, что в области 1 (рис. 3а) элементный состав частицы представлен кремнием и кислородом. В области 2 (рис. 3б) частицы представлены кристаллами гексафторсиликата натрия.

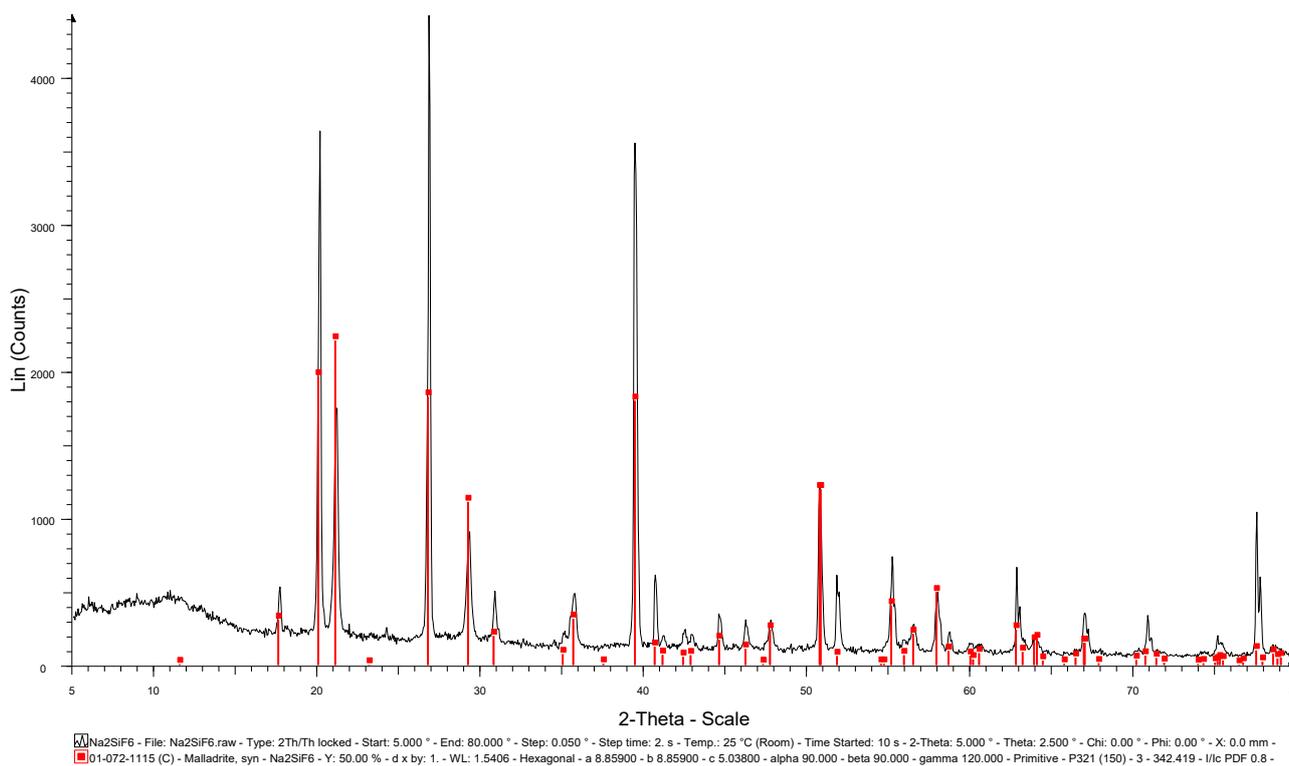
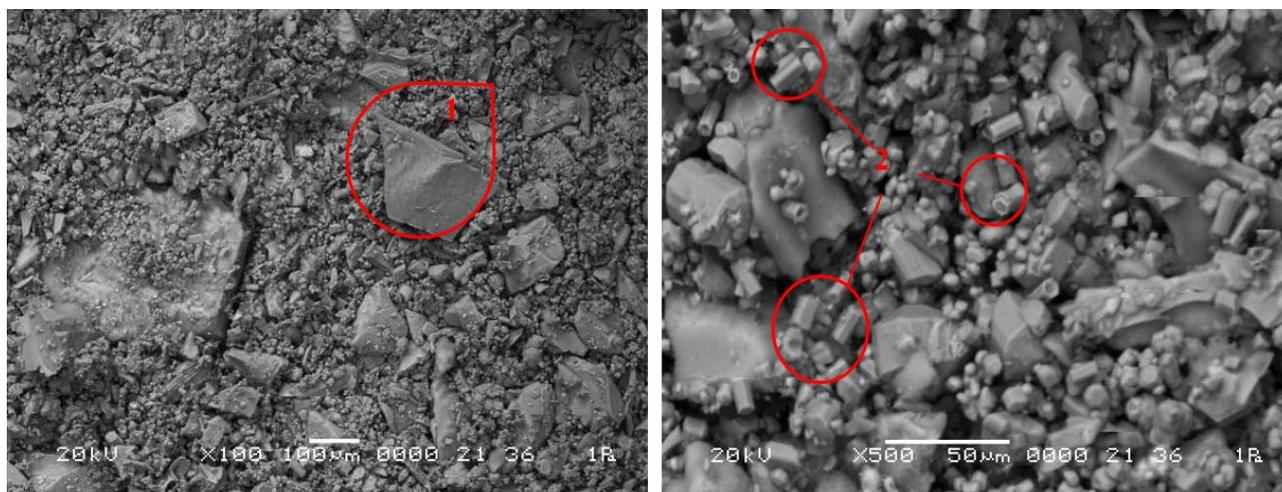


Рис. 2. Рентгенограмма целевого продукта



*a*

*б*

Рис. 3. Микрофотографии нерастворимого осадка, отделяемого на стадии перекристаллизации.  
Кратность увеличения: *a* — 100; *б* — 500

Данные рентгенофазового анализа фазового состава нерастворимого осадка полностью подтверждают результаты энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного анализа и электронной микроскопии. В качестве основной фазы осадок содержит диоксид кремния и гексафторсиликат натрия в виде примеси.

Результаты химического анализа полученного целевого продукта по сравнению с действующими требованиями к качеству кремнефторида натрия представлены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнительная таблица качества, получаемого гексафторсиликата натрия

Регламентируемые показатели	ТУ 2621-010-69886968-2013	ТУ 113-08-587-87 Первый сорт	Порученный продукт ( $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ )
Массовая доля $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ , %, не менее	80	95	96,3
Массовая доля свободной кислотности (HF), %, не более	0,2	Не нормируется	0,05
Массовая доля хлоридов (HCl), %, не более	Не нормируется	0,1	Отсутствует
Массовая доля железа ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), %, не более	Не нормируется	Не нормируется	Отсутствует
Массовая доля $\text{H}_2\text{O}$ , %, не более	0,1	1	1
Массовая доля мышьяка (As), %, не более	Не нормируется	0,003	Отсутствует
Массовая доля тяжелых металлов, %, не более	Не нормируется	0,05	Отсутствует

### Выводы

Разработан способ переработки гексафторкремниевого отхода очистки ЭФК с получением технического гексафторсиликата натрия, который по содержанию основного вещества и остальным показателям полностью отвечает требованиям ТУ 113-08-587-87, предъявляемым к техническому гексафторсиликату натрия первого сорта и существенно превосходит требования ТУ 2621-010-69886968-2013.

### Список источников

1. Дормешкин О. Б., Гаврилюк А. Н., Мохорт М. С., Бышик А. А. Исследование процесса обесфторивания экстракционной фосфорной кислоты комбинированным методом // Химическая промышленность сегодня. 2024. № 6. С. 19–28.
2. Справочник по растворимости. Бинарные системы / В. Б. Коган [и др.]. Изд-во АН СССР, 1961. Т. 1. Кн. 1. С. 135.
3. Vålbe R., Mæroeg U., Löhmus A. [etc.]. A novel route of synthesis of sodium hexafluorosilicate two component cluster crystals using  $\text{BF}_4^-$  containing ionic liquids // Journal of Crystal Growth. 2012. Vol. 361 P. 51–56.

### References

1. Dormeshkin O. B., Hauryliuk A. N., Mokhart M. S., Byshik A. A. Issledovanie protsesssa obesftorivaniya ekstraktsionnoy fosfornoj kisloty kombinirovannym metodom [Studying the process of bleaching extraction phosphoric acid with a combined method]. *Himicheskaya promyshlennost' segodnya* [Chemical industry today], 2024. No. 6. pp. 19–28. (In Russ.).
2. Kogan V. B. et al. Spravochnik po rastvorimosti. Binarnye sistemy [Handbook of Solubility. Binary Systems]. *Izd-vo AN SSSR* [Publishing house of the USSR Academy of Sciences], 1961. Vol. 1. Book 1. P. 135. (in Russ.).
3. Vålbe R., Mæroeg U., Löhmus A. [etc.]. A novel route of synthesis of sodium hexafluorosilicate two component cluster crystals using  $\text{BF}_4^-$  containing ionic liquids. *Journal of Crystal Growth*, 2012, Vol. 361, pp. 51–56.

### Информация об авторах

**М. С. Мохорт** — аспирант;

**О. Б. Дормешкин** — доктор технических наук, профессор;

**А. А. Бышик** — аспирант;

**А. Н. Гаврилюк** — кандидат технических наук, доцент, проректор по учебной работе.

### Information about the authors

**M. S. Mokhart** — Postgraduate Student;

**O. B. Dormeshkin** — Dr. Sc. (Technical), Professor;

**A. A. Byshyk** — Postgraduate Student;

**A. N. Hauryliuk** — PhD (Technical), Associate Professor, Vice Rector for Academic Affairs.

Статья поступила в редакцию 26.06.2025; одобрена после рецензирования 25.08.2025; принята к публикации 27.08.2025.  
The article was submitted 26.06.2025; approved after reviewing 25.08.2025; accepted for publication 27.08.2025.