

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

Объект авторского права

УДК 661.632.1.058

**МОХОРТ**  
**Марк Сергеевич**

**ТЕХНОЛОГИЯ ОЧИСТКИ  
ЭКСТРАКЦИОННОЙ ФОСФОРНОЙ КИСЛОТЫ  
И ПОЛУЧЕНИЯ КОРМОВЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ ФОСФАТОВ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности  
05.17.01 – Технология неорганических веществ

Минск 2026

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет» (БГТУ).

Научный руководитель: **Дормешкин Олег Борисович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии неорганических веществ и общей химической технологии учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»

Официальные оппоненты: **Шевчук Вячеслав Владимирович**, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор химических наук, доцент, заведующий лабораторией минеральных удобрений Государственного научного учреждения «Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси»; **Штепа Владимир Николаевич**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой промышленной экологии учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»


Оппонирующая организация: **Белорусский национальный технический университет**

Защита состоится «04» июня 2026 г. в 12:00 ч на заседании совета по защите диссертаций Д 02.08.02 при учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет» по адресу: 220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, ауд. 240, корп. 4.  
E-mail: [dyadenko@belstu.by](mailto:dyadenko@belstu.by), тел.: 8-(017)-392-71-24.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет».

Автореферат разослан «24» апреля 2026 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций Д 02.08.02  
кандидат технических наук, доцент



М.В. Дяденко

## ВВЕДЕНИЕ

Фосфорная кислота является одним из наиболее крупнотоннажных неорганических продуктов химической промышленности. В 2024 г. мировые мощности по ее производству составили 67,36 млн т (в пересчете на  $P_2O_5$ ), и к 2029 г., согласно прогнозам, достигнут 82,87 млн т  $P_2O_5$ .

Получаемая кислотным разложением природных фосфатов экстракционная фосфорная кислота (ЭФК) содержит в своем составе значительное количество примесей. Существенное сокращение мощностей по производству термической фосфорной кислоты привело к поиску новых методов получения очищенной экстракционной фосфорной кислоты (ОЭФК).

Несмотря на наличие в Республике Беларусь собственного производства ЭФК на базе ОАО «Гомельский химический завод» (ОАО «ГХЗ»), непосредственное использование ее для организации выпуска кормовых и технических фосфатов невозможно, а налаживание производства ОЭФК на ее основе требует проведения комплекса исследований и разработки наиболее рациональной и рентабельной для условий действующего в стране производства технологии очистки ЭФК с учетом перерабатываемых видов фосфатного сырья.

Как показал анализ литературных данных, ни один из известных методов очистки ЭФК не позволяет получать фосфорную кислоту высокой степени чистоты, ряд способов связан с технологическими сложностями их реализации, либо использованием дорогостоящих реагентов, поэтому среди наиболее перспективных направлений является разработка комбинированных технологий производства ОЭФК, основанных на сочетании нескольких отдельных методов.

Таким образом, актуальность темы диссертационного исследования обусловлена необходимостью разработки эффективной технологии очистки ЭФК с получением ОЭФК, пригодной для последующего производства востребованных импортозамещающих видов продукции – кормовых и технических фосфатов.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Связь работы с научными программами (проектами), темами.** Тема диссертационной работы соответствует приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности Республики Беларусь на 2026–2030 гг., утвержденным указом Президента Республики Беларусь от 01.04.2025 г. № 135, научным направлениям учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет» и выполнялась в рамках следующих научных программ: Государственная программа научных исследований «Химические процессы, реагенты и технологии, биорегуляторы и биооргхимия», утвержденная Советом Министров Республики Беларусь, постановление № 438 от 27.07.2020 г., задание 1.3 «Исследование особенностей распределения ионогенных и гетерогенных примесей в системе  $CaSO_4 - H_3PO_4 - H_2O$  при получении ортофосфорной кислоты на основе

различных видов фосфатного сырья, изучение химических и физико-химических способов ее очистки с получением кормовых фосфатов и технических солей» (ГБ 21–109, № гос. регистрации 20211932, 2021–2023 гг.); задание 2.1.9 «Разработка метода получения ортофосфорной кислоты технической квалификации на основе комплексной очистки экстракционной фосфорной кислоты» (ГБ 24–107, № гос. регистрации 20240816, 2024–2025 гг.); по договорам, выполняемым в соответствии с планами инновационных работ концерна «Белнефтехим» и ОАО «ГХЗ»: «Исследование процессов получения экстракционной фосфорной кислоты из новых видов фосфатного сырья с целью определения их физико-химических и технологических особенностей» (ХД 21–440, № гос. регистрации 20213722, 2021–2022 гг.); «Исследование особенностей производства с обоснованием мощности цеха фосфорной кислоты в зависимости от состава исходного сырья» (ХД 25–074, № гос. регистрации 20250751, 2025 г.); «Исследование физико-химических особенностей получения монокалийфосфата из упаренной кислоты производства ОАО «ГХЗ» (ХД 25–379, № гос. регистрации 20251485, 2025 г.).

**Цель, задачи, объект и предмет исследования.** *Цель исследования* – изучить физико-химические процессы, протекающие при очистке ЭФК от ионогенных примесей  $F^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $SiF_6^{2-}$ ,  $Me^{n+}$  с учетом особенностей различных видов исходного фосфатного сырья; установить оптимальные технологические режимы и разработать технологии очистки ЭФК с получением на ее основе импортозамещающих видов продукции – кормовых и технических фосфатов.

Основные научные и прикладные *задачи исследования*, решение которых обеспечивает достижение поставленной цели:

– изучение распределения ионогенных примесей фторидов, сульфатов, оксидов щелочных, щелочноземельных и поливалентных металлов, тяжелых металлов и мышьяка в системе  $CaSO_4 - H_3PO_4 - H_2O$  при получении ЭФК, а также на стадии ее упарки в зависимости от вида и качества применяемого фосфатного сырья;

– научное обоснование технологического процесса обезфторивания неупаренной и упаренной ЭФК реагентным методом с выделением примесей в составе малорастворимых кремнефторидов щелочных металлов; установление остаточного содержания фторид-ионов на основе изучения растворимости в системе  $Na_2SiF_6 - H_3PO_4 - H_2O$ ;

– экспериментальное установление влияния технологических параметров и определение оптимального режима основных технологических стадий (приготовление осадительной композиции, химическое взаимодействие с последующим осаждением малорастворимых кремнефторидов щелочных металлов, разделение, отмывка и отдувка фторсодержащих примесей), обеспечивающего достижение необходимой для последующего получения технических и кормовых фосфатов степени очистки неупаренной и упаренной ЭФК;

– разработка метода количественного определения содержания фтора в составе комплексных соединений в растворах очищенной ортофосфорной

кислоты с учетом влияния примесей для прогнозирования остаточного содержания фтора в ОЭФК;

– разработка технологических процессов переработки образующегося в процессе очистки ЭФК гексафторкремниевого отхода с получением технических продуктов;

– промышленные испытания технологии получения кислоты ортофосфорной очищенной и отработка технологических параметров отдельных технологических стадий;

– разработка технологий комбинированной очистки неупаренной и упаренной ЭФК и ее последующей переработки с получением кормовых и технических фосфатов.

*Объектом исследования* явилась технология очистки ЭФК, а также процессы, протекающие в многокомпонентных водно-солевых системах, образующихся на отдельных стадиях ее очистки.

*Предмет исследования* – химические и физико-химические процессы, протекающие в многокомпонентной водно-солевой системе  $\text{PO}_4^{3-} - \text{F}^- - \text{SiF}_6^{2-} - \text{SO}_4^{2-} - \text{Me}^{n+} - \text{H}_2\text{O}$  при очистке ЭФК, с учетом особенностей химического и минералогического состава различных видов фосфатного сырья, применяемого для ее получения, а также процессы, протекающие на отдельных технологических стадиях: химического взаимодействия и осаждения, фильтрации, отдувки и упарки.

#### **Научная новизна:**

– новые научные данные о фазовом распределении ионогенных примесей фторидов, сульфатов, оксидов щелочных, щелочноземельных и поливалентных металлов, тяжелых металлов и мышьяка в системе  $\text{CaSO}_4 - \text{H}_3\text{PO}_4 - \text{H}_2\text{O}$  при получении ЭФК, а также на стадии ее упарки в зависимости от вида и качества применяемого фосфатного сырья;

– экспериментально установленные данные растворимости гексафторсиликата натрия в системе  $\text{Na}_2\text{SiF}_6 - \text{H}_3\text{PO}_4 - \text{H}_2\text{O}$  в изотермическом и политермическом режимах в интервале изменения температуры 20–80°C и содержания ортофосфорной кислоты 40–65 мас. %, соответствующие фактическим изменениям указанных параметров при получении ОЭФК;

– методика количественного определения содержания фтора в составе комплексных соединений в растворах очищенной ортофосфорной кислоты, учитывающая частичное содержание фтора в составе ионных и молекулярных форм фторидов и комплексных соединений, а также влияние ионогенных примесей, содержащихся в растворах неупаренной и упаренной ЭФК;

– новые научные данные о влиянии технологических параметров на процесс реагентной очистки неупаренной и упаренной ЭФК от вида и количества ионогенных примесей, обеспечивая их выделение в составе малорастворимых кремнефторидов щелочных металлов, а также на стадию отдувки;

– экспериментально установленные показатели физико-химических и химико-технологических свойств суспензий и осадков, образующихся на отдельных технологических стадиях, а также обоснование возможности повышения эффективности обесфторивания ЭФК путем дополнительного

введения стадии старения суспензии.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Новые научные данные о фазовом распределении ионогенных примесей фторидов, сульфатов, оксидов щелочных, щелочноземельных и поливалентных металлов, тяжелых металлов и мышьяка в системе  $\text{CaSO}_4 - \text{H}_3\text{PO}_4 - \text{H}_2\text{O}$  в производстве ЭФК при переработке фосфатного сырья различного химического и минералогического составов.

2. Экспериментально установленные данные растворимости гексафторсиликата натрия в системе  $\text{Na}_2\text{SiF}_6 - \text{H}_3\text{PO}_4 - \text{H}_2\text{O}$  в области концентрированных растворов ортофосфорной кислоты в изотермическом и политермическом режимах в интервале изменения температуры 20–80°C и разработанная методика определения содержания фтора в составе комплексных соединений в растворах очищенной ортофосфорной кислоты с учетом влияния ионогенных примесей, послужившие теоретической основой выбора комбинированного метода обесфторивания ЭФК, включающего осаждение с использованием натрийсодержащих реагентов и последующую отдувку, а также прогнозирования остаточного содержания фторид-ионов.

3. Состав осадительной композиции и установленные оптимальные параметры технологических стадий очистки ЭФК, обеспечивающие снижение остаточного содержания фтора в кислоте с 0,263–1,800 до 0,015–0,043 мас. % для различных видов исходного фосфорсодержащего сырья, минимального остаточного содержания примесей тяжелых металлов и мышьяка.

4. Разработанная ресурсосберегающая технология комбинированной очистки ЭФК с получением целевого продукта – очищенной ортофосфорной кислоты, соответствующей нормативным требованиям для производства кормовых и технических фосфатов, а также побочного продукта – технического гексафторсиликата натрия.

**Личный вклад соискателя ученой степени.** Вклад автора диссертационной работы выражается в анализе литературных данных, разработке методологии исследований, их проведении, обработке результатов и подготовке публикаций, разработке нормативно-технической документации, участии в проведении производственных испытаний. Автор является соисполнителем работ, выполнявшихся в рамках государственных программ научных исследований и договоров НИР. Вклад научного руководителя О.Б. Дормешкина заключается в совместном определении объекта и предмета исследования, постановке цели и задач работы, в обсуждении результатов исследования. В публикациях с А. Н. Гаврилюком, А. И. Клындюком, А. А. Бышиком и Д. В. Черняковым вклад соавторов состоял в обсуждении методологии отдельных экспериментов, результатов исследований и выводов.

**Апробация результатов диссертации и информация об использовании ее результатов.** Результаты исследований, включенные в диссертацию, докладывались на следующих научных форумах, конференциях и выставках: V Международном научно-техническом форуме по химическим технологиям и нефтегазопереработке (г. Минск, 2022 г.); XXVII и XXIX Международной научно-практической конференции «Инновация-2023», «Инновация-2025»

(г. Ташкент, 2023, 2025 г.); Республиканской научно-практической конференции «Перспективы развития инновационных технологий производства неорганических веществ и материалов в условиях глобализации» (г. Ташкент, 2023 г.); XVIII и XIX Всероссийской научно-технической конференция «Научно-практические проблемы в области химии и химических технологий» (г. Апатиты, 2024, 2025 г.); VII и VIII Международном научно-техническом форуме по химическим технологиям и нефтегазопереработке (г. Минск, 2024, 2025 г.); четырех научно-технических конференциях БГТУ (2022–2025 гг.); 31-й Международной выставке «НИ-ТЕСН'2025» (г. Санкт-Петербург, 2025 г.).

Разработана нормативно-техническая документация, включая технические условия, лабораторно-технологические регламенты, программу промышленных испытаний. Производственные испытания ресурсосберегающей технологии комбинированной очистки экстракционной фосфорной кислоты, проведенные на ОАО «Гомельский химический завод», подтвердили возможность промышленной реализации разработанной технологии.

**Опубликование результатов диссертации.** По результатам выполненного исследования опубликовано 17 печатных работ (6,88 авт. листа), в том числе 1 монография, 4 статьи в научных изданиях, включенных в перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертаций и 1 статья в иностранном научном издании, 2 статьи в других научных журналах, 6 материалов научно-технических конференций. Получен 1 патент Республики Беларусь, подано 2 заявки на выдачу патента Республики Беларусь на изобретение.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из содержания, перечня сокращений и обозначений, введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Полный объем диссертации составляет 222 страницы, из них 48 страниц занимают 38 рисунков и 51 таблица, 53 страницы – 21 приложение, 24 страницы – список использованных источников, включающий 258 наименований и 17 публикаций соискателя.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

**В первой главе** представлен аналитический обзор современных методов очистки ЭФК и ее переработки с получением технических продуктов. Проанализировано состояние рынка, мировые тенденции и направления развития производств фосфорной кислоты. Выполненный анализ современных методов и технологий очистки ЭФК позволил сделать вывод, что получение ОЭФК высокой степени чистоты возможно только с использованием технологий, включающих комбинирование различных методов очистки. При этом различия в составе фосфатного сырья и продукционной ЭФК и упаренной экстракционной фосфорной кислоте (УЭФК), направлениях последующей переработки ОЭФК и видах целевых продуктов, региональной доступности и стоимости реагентов определяют выбор методов. Как показал анализ, информация о химических и физико-химических процессах и превращениях,

протекающих на отдельных стадиях очистки, влиянии химического состава фосфатного сырья и производственной ЭФК недостаточна полная, носит несистемный характер и требует проведения научных исследований с учетом особенностей действующего в Республике Беларусь производства. Анализ видов кормовых и технических фосфатов, их характеристик и методов получения показал, что, несмотря на наличие в стране крупнотоннажного производства ЭФК, производство кормовых и технических фосфатов на ее основе невозможно ввиду высокого содержания примесей и жестких требований, предъявляемых к качеству продукции.

Исходя из анализа литературных данных, актуальности разработки технологии комбинированной очистки ЭФК с получением на ее основе кормовых и технических фосфатов, обоснована цель и задачи диссертационной работы.

**Вторая глава** посвящена выбору объекта исследования, описанию исходных веществ, методик эксперимента и методов исследования, используемого оборудования.

Химический анализ сырья, промежуточных и конечных продуктов, а также изучение их свойств проводили по стандартным методикам, принятым в технологии неорганических веществ. При выполнении работы применяли современные методы физико-химического анализа с использованием научного оборудования и приборов известных мировых производителей: ИК-Фурье-спектрометра NEXUS компании NICOLET, электронного микроскопа JEOL JSM-5610LV, рентгеновского дифрактометра D8 Advance фирмы Bruker, атомно-эмиссионного спектрометра iCAP 7200 фирмы Thermo Fisher Scientific и др. Обоснованность и достоверность результатов исследований базируется на высокой воспроизводимости экспериментальных данных, не противоречащих фундаментальным научным представлениям, и подтверждается положительными результатами промышленных испытаний.

**Третья глава** посвящена исследованию особенностей распределения ионогенных примесей в системе  $\text{CaSO}_4 - \text{H}_3\text{PO}_4 - \text{H}_2\text{O}$  в производстве ЭФК при использовании различных видов исходного фосфатного сырья на лабораторной установке и в условиях действующего производства.

На основании результатов исследования химического и минералогического составов различных видов фосфатного сырья, импортируемого Республикой Беларусь и используемого для производства ЭФК на ОАО «ГХЗ»: апатитового концентрата Кировского месторождения России и североафриканских фосфоритов Марокко марок К-9, К-10 и К-20, установлено существенное перераспределение количественного содержания отдельных минералов, в частности фторапатита и карбонатфторапатита. Несмотря на близость химического состава, соотношение отдельных фосфорсодержащих фаз для различных марок фосфоритов существенно отличается. Так, в марке К-10 соотношение карбонатфторапатита к фторапатиту составляет 2,28, в то время как у других марок существенно меньше и варьируется от 1,30 до 1,68. При этом в составе фосфорита марки К-10 не идентифицирован доломит, который присутствует в марках К-9 и К-20. Такие отличия в вещественном составе

являются существенными и могут оказывать значительное влияние как на технологический режим кислотного разложения, так и на распределение основных ионогенных примесей.

Различия в минералогическом составе фосфорсодержащего сырья приводят к существенному изменению как характера распределения фтора между отдельными фазами в системе  $\text{CaSO}_4 - \text{H}_3\text{PO}_4 - \text{H}_2\text{O}$ , так и процесса выделения фтора в газовую фазу в целом. Так, суммарное количество фтора в составе фосфогипса возрастает с 5,20 мас. % для апатитового концентрата до 8,71–13,90 мас. % для фосфоритов Марокко различных марок, а его количество, выделяющегося в газовую фазу на стадии разложения фосфорсодержащего сырья, снижается с 63,3% до 53,9–60,4% соответственно. Анализ распределения сульфатов между ЭФК и фосфогипсом показывает незначительные колебания их содержания в ЭФК (от 1,68 до 2,03 мас. %) несмотря на существенный разброс в содержании сульфатов для отдельных видов фосфатного сырья от 0,10 до 1,19 мас. %. Это позволяет сделать вывод, что остаточное содержание сульфатов в кислоте определяется растворимостью сульфата кальция в жидкой фазе (таблицы 1, 2). Общее количество оксидов железа и алюминия, переходящих в жидкую фазу, невелико, и составляет от 3,46 до 3,52 мас. % (от общего количества). Суммарное количество переходящих в жидкую фазу примесей тяжелых металлов и мышьяка низкое и составляет  $3,41 \cdot 10^{-5}$  мас. % для ЭФК, полученной из апатитового концентрата, и от  $70,71 \cdot 10^{-5}$  до  $85,92 \cdot 10^{-5}$  мас. % для ЭФК из фосфоритов Марокко.

Существенное влияние на распределение примесей при получении ЭФК оказывает конструкция и режим работы фильтрационного оборудования, условия отмывки, аппаратурное оформление. Для получения данных о фактическом распределении примесей проведено комплексное обследование работы цеха по производству ЭФК ОАО «ГХЗ» при переходе на кировский апатитовый концентрат, фосфориты Марокко марок К-9 и К-10. Результаты исследований показали, что данные, касающиеся распределения фтора и других примесей между отдельными фазами, для различных видов фосфатного сырья хорошо коррелируются с результатами, полученными в лабораторных условиях, что позволило сделать вывод о достоверности результатов исследований.

**В четвертой главе** представлены исследования растворимости гексафторсиликата натрия в системе  $\text{Na}_2\text{SiF}_6 - \text{H}_3\text{PO}_4 - \text{H}_2\text{O}$  в изотермическом и политермическом режимах в интервалах изменения температуры 20–80°C и содержания ортофосфорной кислоты 40–65 мас. % (рисунок 1), которые явились теоретическим обоснованием для прогнозирования достигаемого остаточного содержания фторид-ионов и выбора оптимальных условий осуществления технологического процесса обесфторивания ЭФК методом осаждения с использованием натрийсодержащих реагентов.

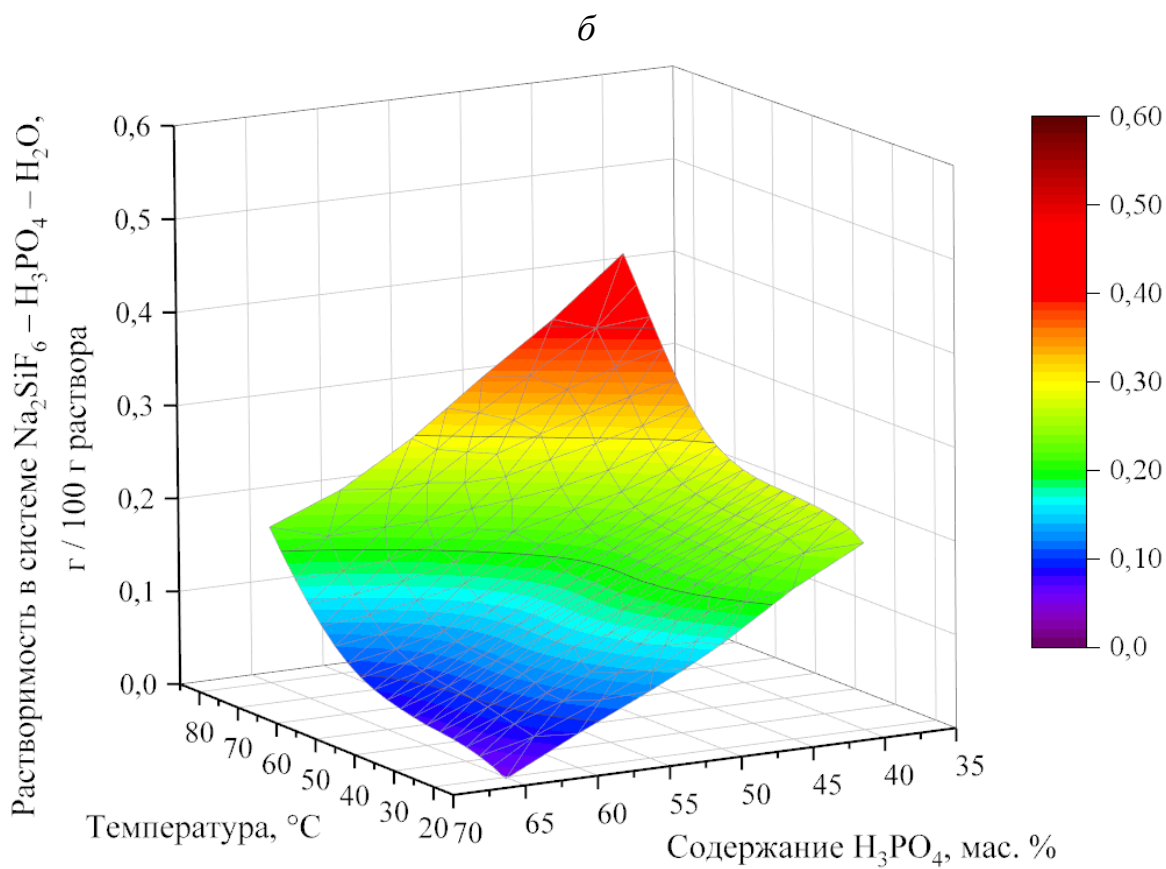
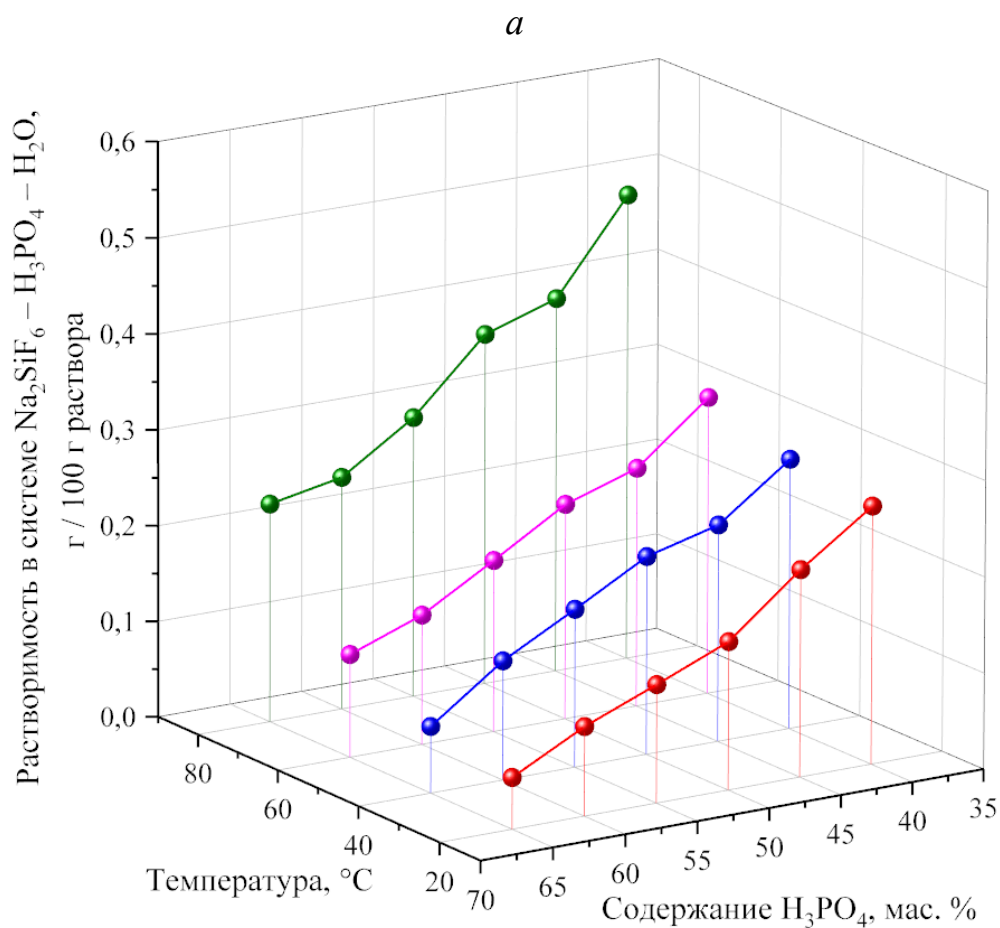
Изучены процессы очистки ЭФК химическим методом с выделением примесей в составе малорастворимых кремнефторидов щелочных металлов, а также влияние отдельных технологических параметров.

Таблица 1 – Распределение фтора и сульфатов в системе  $\text{CaSO}_4 - \text{H}_3\text{PO}_4 - \text{H}_2\text{O}$  при получении ЭФК на основе кировского апатитового концентрата на лабораторной установке

| Содержание в ЭФК, мас. % |                        | Соотношение $\text{F}^-/\text{P}_2\text{O}_5$ |             | Распределение фтора, % от общего содержания |           |  | Сульфаты (в пересчете на $\text{SO}_3$ ), % |           |
|--------------------------|------------------------|---|-------------|---|-----------|--|---|-----------|
| $\text{F}^-$             | $\text{P}_2\text{O}_5$ | ЭФК   | фосфогипс   | ЭФК   | фосфогипс | количество фтора, выделяющегося в газовую фазу при получении ЭФК | ЭФК   | фосфогипс |
| 0,89–0,93                | 28,24–28,38            | 0,032–0,033                                   | 0,122–0,123 | 31,50                                       | 5,20      | 63,30  | 1,92–2,03                                   | 56,3–57,0 |

Таблица 2 – Распределение фтора и сульфатов в системе  $\text{CaSO}_4 - \text{H}_3\text{PO}_4 - \text{H}_2\text{O}$  при получении ЭФК на основе фосфоритов Марокко на лабораторной установке

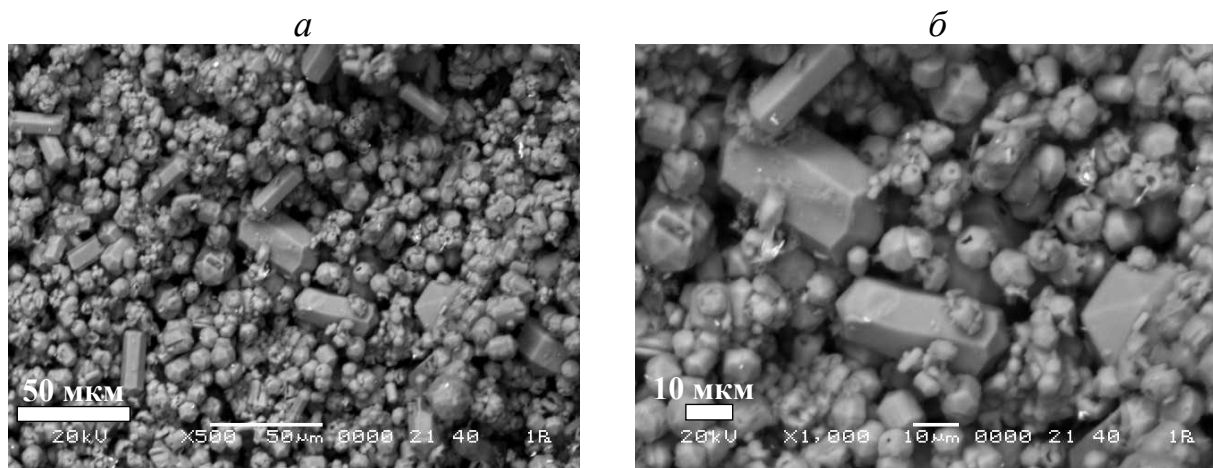
| Вид фосфатного сырья   | Содержание в ЭФК, мас. % |                        | Соотношение $\text{F}^-/\text{P}_2\text{O}_5$ |             | Распределение фтора, % от общего содержания |           |  | Сульфаты (в пересчете на $\text{SO}_3$ ), % |             |
|------------------------|--------------------------|------------------------|---|-------------|---|-----------|--|---|-------------|
|                        | $\text{F}^-$             | $\text{P}_2\text{O}_5$ | ЭФК   | фосфогипс   | ЭФК   | фосфогипс | количество фтора, выделяющегося в газовую фазу при получении ЭФК | ЭФК   | фосфогипс   |
| Фосфориты Марокко К-9  | 0,97–1,05                | 25,83–26,43            | 0,038–0,040                                   | 0,098–0,099 | 37,40                                       | 8,71      | 53,90  | 1,72–1,86                                   | 57,30–57,90 |
| Фосфориты Марокко К-10 | 0,82–0,88                | 26,22–27,00            | 0,031–0,033                                   | 0,122–0,123 | 26,70                                       | 13,90     | 59,40  | 1,84–1,95                                   | 56,20–57,00 |
| Фосфориты Марокко К-20 | 1,05–1,17                | 26,64–26,82            | 0,041–0,042                                   | 0,257–0,258 | 28,80                                       | 10,80     | 60,40  | 1,68–1,78                                   | 56,80–57,50 |



**Рисунок 1 – Изотермы (а) и политермы (б) растворимости гексафторсиликата натрия в системе  $\text{Na}_2\text{SiF}_6 - \text{H}_3\text{PO}_4 - \text{H}_2\text{O}$**

Предложена композиция осадительного реагента, количественный состав и соотношение отдельных ингредиентов в котором обеспечивают достижение максимальной степени обесфторивания ЭФК и снижение остаточного содержания фтора на стадии реагентной очистки с 0,263–1,800 до 0,040–0,072 мас. % в зависимости от вида кислоты, а также достижение минимального остаточного содержания тяжелых металлов и мышьяка.

Установлено, что лимитирующей стадией реагентной очистки является стадия роста кристаллов гексафторсиликата натрия. На стадии старения наблюдается рост кристаллов в виде отдельных, ближе к изометричной форме кристаллов, впоследствии приобретающих удлиненную форму с пирамидальным габитусом, с предположительно гексагональной сингонией размером 30–40 мкм (рисунок 2). Указанный процесс сопровождается существенным улучшением основных химико-технологических характеристик осадков. Так, коэффициент фильтрации ( $K_f$ ) возрастает с  $9,04 \cdot 10^{-6}$  (исходный) до  $2,59 \cdot 10^{-5}$  см/с (через 48 ч), скорость отстаивания с 0,04 до 0,23 см/мин, конечный объем отстоя снижается с 6,70 до 3,41% соответственно.



Кратность увеличения: *a* – 500; *б* – 1000

**Рисунок 2 – Микрофотографии осадка, образующегося в процессе реагентной очистки**

По результатам исследований определены оптимальные параметры и нормы технологического режима обесфторивания ЭФК. Причем разница в химическом и минералогическом составах исходных фосфатных руд для получения ЭФК предопределяют отличия оптимальных параметров технологического режима отдельных стадий ее очистки.

Использование комбинированной очистки, включающей реагентную стадию с выделением из ЭФК примесей в составе малорастворимых кремнефторидов щелочных металлов с последующей отдувкой фторсодержащих примесей при использовании инертного газа-носителя (воздуха), обеспечивает достижение остаточного содержания фтора от 0,015 до 0,043 мас. % (таблица 3), что, в свою очередь, позволяет ее последующее использование для получения кормовых и технических фосфатов.

Таблица 3 – Содержание компонентов в кислоте в зависимости от вида фосфатного сырья и метода очистки

| Компоненты                     | Содержание, мас % |                            |                           |                |                            |                           |                |                            |                           |
|--------------------------------|-------------------|----------------------------|---------------------------|----------------|----------------------------|---------------------------|----------------|----------------------------|---------------------------|
|                                | ЭФК (Марокко)     |                            |                           | УЭФК (Марокко) |                            |                           | УЭФК (Кировск) |                            |                           |
|                                | исходная ЭФК      | очистка реагентным методом | комбини- рованная очистка | исходная УЭФК  | очистка реагентным методом | комбини- рованная очистка | исходная УЭФК  | очистка реагентным методом | комбини- рованная очистка |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 22,64             | 23,18                      | 52,12                     | 48,020         | 48,010                     | 51,52                     | 49,088         | 48,74                      | 53,300                    |
| F <sup>-</sup>                 | 1,800             | 0,075                      | 0,043                     | 0,263          | 0,042                      | 0,015                     | 0,310          | 0,040                      | 0,015                     |
| CaO                            | 0,289             | 0,216                      | 0,119                     | 0,179          | 0,161                      | 0,121                     | 0,257          | 0,234                      | 0,020                     |
| MgO                            | 0,095             | 0,099                      | 0,183                     | 0,173          | 0,187                      | 0,179                     | 0,188          | 0,196                      | 0,192                     |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1,590             | 0,930                      | 1,213                     | 0,272          | 0,186                      | 0,211                     | 1,600          | 0,978                      | 1,046                     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1,635             | 0,820                      | 0,865                     | 0,253          | 0,174                      | 0,250                     | 0,987          | 0,610                      | 0,982                     |
| K <sub>2</sub> O               | 0,098             | 0,015                      | 0,015                     | 0,019          | 0,009                      | 0,007                     | 0,108          | 0,051                      | 0,048                     |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,328             | 0,655                      | 0,086                     | 0,049          | 0,338                      | 0,048                     | 0,168          | 0,452                      | 0,025                     |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>  | 3,350             | 3,314                      | 2,845                     | 2,937          | 2,908                      | 2,900                     | 2,867          | 2,829                      | 2,798                     |
| Pb, ppm                        | 0,242             | 0,110                      | 0,120                     | 0,255          | 0,092                      | 0,096                     | 0,020          | 0,008                      | 0,009                     |
| Cd, ppm                        | 3,120             | 0,388                      | 0,392                     | 5,830          | 0,398                      | 0,400                     | 0,031          | 0,028                      | 0,030                     |
| Hg, ppm                        | 0,141             | 0,080                      | 0,082                     | 0,261          | 0,092                      | 0,093                     | 0,164          | 0,082                      | 0,084                     |
| As, ppm                        | 7,648             | 0,756                      | 0,783                     | 6,617          | 0,852                      | 0,881                     | 0,022          | 0,021                      | 0,021                     |

Значительная часть фтора в ЭФК и ОЭФК находится в составе комплексных соединений, характеризующихся высокой химической устойчивостью и, как следствие, не удаляющихся в процессе очистки. Сложность описания процессов комплексообразования и их количественного определения в растворах ЭФК заключается в поливариантности качественного и количественного состава кислоты. В рамках диссертационного исследования разработаны новые методики количественного определения содержания фтора в составе комплексных соединений в растворах ОЭФК и очищенной упаренной экстракционной фосфорной кислоте (ОУЭФК): методики расчета содержания фтора в составе ионных и молекулярных форм фторидов и комплексных соединений (1-й вариант), а также его количества с учетом влияния примесей в растворах фосфорных кислот (2-й вариант), основанные на применении экспериментальных данных растворимости гексафторсиликатов в растворах фосфорной кислоты.

Полученные результаты подтвердили невозможность достижения полного удаления фтора и его соединений использованием лишь осадительного метода ввиду присутствия его в составе комплексных соединений (таблица 4), что позволило прогнозировать его остаточное содержание в ОЭФК в процессе комбинированной очистки и явилось теоретическим обоснованием возможности достижения более глубокой степени обесфторивания ЭФК путем введения дополнительной стадии ее отдувки.

Таблица 4 – Содержание фтора в составе ОЭФК

| Вид фосфорной кислоты  | Общее содержание фтора, мас. % | Содержание фтора в составе комплексных соединений, мас. % |  |
|--|--------------------------------|---|--|
|  |                                | 1-й вариант   | 2-й вариант (с учетом влияния примесей в составе ОЭФК) |
| ОЭФК (Марокко)<br>23,18 мас. % по P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,075                          | 0,073   | 0,073  |
| ОУЭФК (Марокко)<br>48,01 мас. % по P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | 0,042                          | 0,041   | 0,041  |
| ОУЭФК (Кировск)<br>48,74 мас. % по P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | 0,040                          | 0,039   | 0,039  |

**Пятая глава** посвящена разработке технологических процессов очистки ЭФК с получением продуктов: технического гексафторсиликата натрия на основе гексафторкремниевого отхода очистки ЭФК, кормовых и технических фосфатов калия и аммония на основе ОЭФК.

Представлены результаты производственных испытаний, проведенных на базе ЦЗЛ ОАО «ГХЗ» с целью отработки технологии и отдельных технологических стадий комбинированной очистки ЭФК. В качестве исходных компонентов использовали производственную ЭФК и УЭФК цеха ЦФК-1 и ЦФК-2, полученную на основе различных видов фосфатного сырья. Результаты испытаний подтвердили возможность промышленной реализации

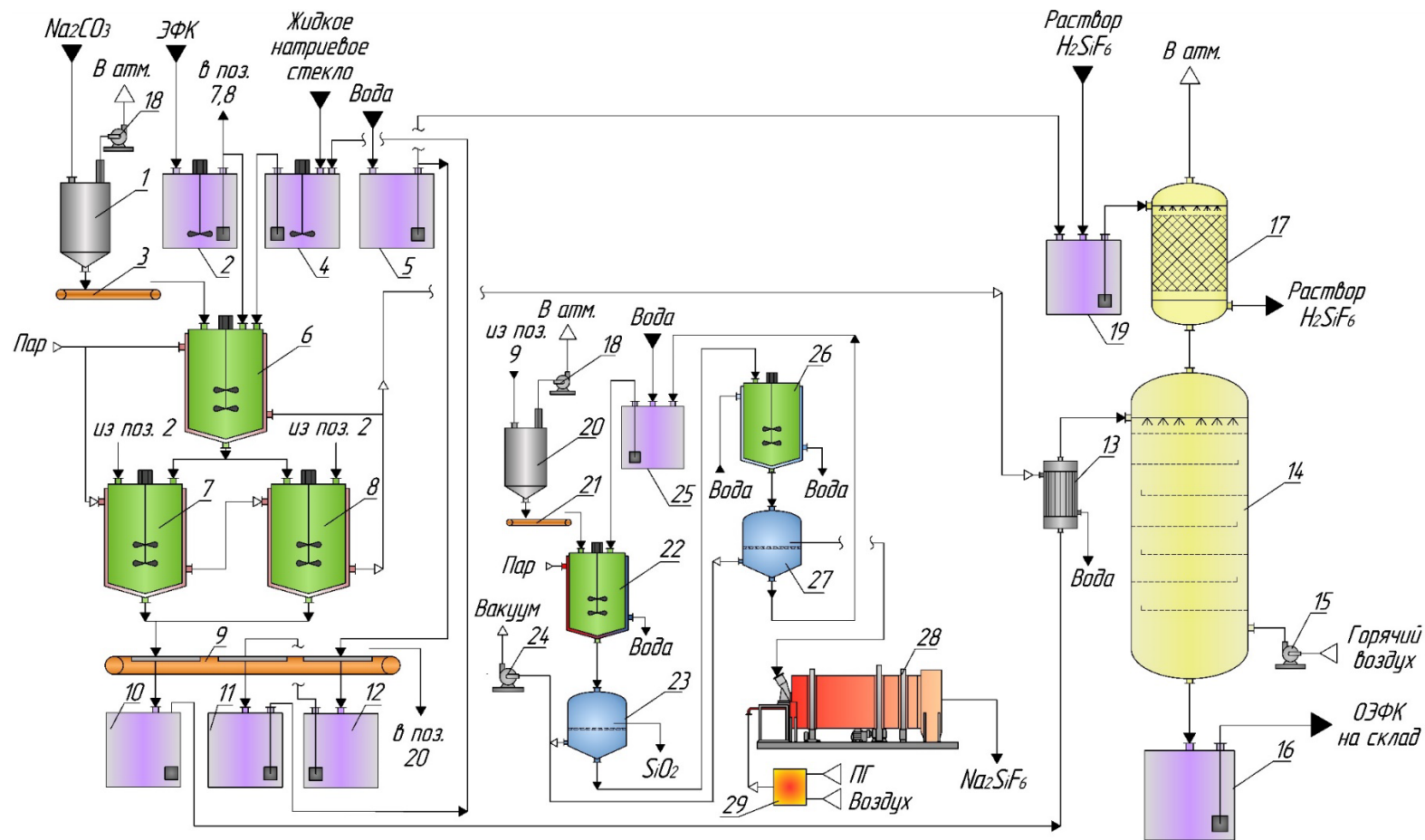
разработанной технологии получения кислоты ортофосфорной очищенной на основе ЭФК, выпускаемой ОАО «ГХЗ», которые хорошо коррелируют с данными лабораторных исследований. По своим физико-химическим показателям наработанная партия кислоты ортофосфорной очищенной соответствует требованиям разработанного ТУ ВУ 100354659.001-2025. Остаточное содержание фтора в зависимости от вида исходного фосфатного сырья составило 0,05–0,07 мас. % (при норме 0,1 мас. %), на основе УЭФК – 0,04 мас. % (при норме 0,05 мас. %).

Технология комбинированной очистки ЭФК предполагает перевод основного количества фтора в твердую фазу, что связано с образованием техногенного отхода, основным компонентом которого, по данным химического и рентгенофазового анализов, является  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ , основной примесью – оксид кремния. Выполнен комплекс исследований по возможности переработки гексафторкремниевого отхода с получением товарного продукта – гексафторсиликата натрия методом перекристаллизации и отработки отдельных технологических стадий. Результаты электронной микроскопии целевого продукта показали, что в процессе кристаллизации наблюдается осаждение полидисперсных по составу образований в виде отдельных призматических монокристаллов. Анализ показателей качества полученного продукта (таблица 5), позволил сделать вывод о том, что по содержанию основного вещества, и по всем остальным показателям он полностью отвечает требованиям ТУ 113–08–587–87, предъявляемым к техническому  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  первого сорта и существенно превосходит требования ТУ 2621–010–69886968–2013. На основании результатов исследований разработан лабораторно-технологический регламент и наработана лабораторная партия продукта – технического гексафторсиликата натрия.

Таблица 5 – Показатели качества получаемого  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$

| Регламентируемые показатели                           | ТУ 2621-010-69886968-2013 | ТУ 113-08-587-87 первый сорт | Полученный продукт ( $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ ) |
|---|---------------------------|------------------------------|--|
| Массовая доля $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ , %, не менее | 80,0                      | 95,000                       | 96,30  |
| Массовая доля свободной кислотности (HF), %, не более | 0,2                       | Не нормируется               | 0,05   |
| Массовая доля хлоридов (HCl), %, не более             | Не нормируется            | 0,100                        | Отсутствует                                      |
| Массовая доля $\text{H}_2\text{O}$ , %, не более      | 0,1                       | 1,000                        | 1,00   |
| Массовая доля мышьяка (As), %, не более               | Не нормируется            | 0,003                        | Отсутствует                                      |
| Массовая доля тяжелых металлов, %, не более           | Не нормируется            | 0,050                        | Отсутствует                                      |

На основании результатов экспериментальных и промышленных испытаний разработана ресурсосберегающая технология комбинированной очистки ЭФК с получением ОЭФК (рисунок 3).



1 – бункер кальцинированной соды; 2 – бак ЭФК; 3, 21 – питатели; 4 – бак жидкого натриевого стекла;  
 5 – бак оборотной воды; 6 – реактор приготовления осадительного реагента; 7, 8 – реактор; 9 – вакуум-фильтр;  
 10 – бак очищенной кислоты; 11, 12 – баки первого и второго фильтратов; 13 – теплообменник; 14 – отдувочная колонна;  
 15 – компрессор; 16 – бак ОЭФК; 17 – абсорбер; 18 – воздуходувка; 19 – бак  $H_2SiF_6$ ; 20 – бункер; 22 – растворитель;  
 23, 27 – нутч-фильтры первой и второй стадии; 24 – вакуум-насос; 25 – бак маточного раствора; 26 – кристаллизатор;  
 28 – сушилка; 29 – топка

**Рисунок 3 – Технологическая схема комбинированной очистки ЭФК**

Ожидаемый годовой экономический эффект организации производства ОЭФК на ОАО «ГХЗ» при выпуске 10 тыс. т в год ОЭФК составляет 9 635 300 долл. США, или 28 230 500 бел. руб. (по курсу на 26.06.2025). Реализация побочного продукта – технического  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  позволит получить дополнительный экономический эффект в размере 690 427 долл. США, или 2 048 013 бел. руб. (по курсу на 26.06.2025).

Представлены результаты экспериментальных исследований отдельных стадий технологических процессов и оптимальных режимов получения кормовых и технических солей на основе ОЭФК – дигидрофосфата калия и дигидрофосфата аммония, которые легли в основу разработанных эффективных технологий их получения.

Полученный дигидрофосфат калия по совокупности всех показателей качества полностью соответствует требованиям действующих технических условий ТУ 2186-007-48590531-2011, ТУ 20.15.75-007-36196786-2019 и ТУ 10.91.10-101-32496445-2020, предъявляемым к водорастворимым фосфорно-калийным удобрениям и кормовому дигидрофосфату калия.

Полученный дигидрофосфат аммония как по содержанию основных компонентов, так и по всем остальным показателям полностью отвечают требованиям ТУ 2148-001-48590531-02, предъявляемым к техническому и кормовому дигидрофосфату аммония (таблица 5).

Таблица 5 – Показатели качества получаемого  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$

| Регламентируемые показатели                                     | Дигидрофосфат аммония ТУ 2148-001-48590531-02 |                | Полученный продукт ( $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ) |
|---|---|----------------|---|
|   | технический                                   | кормовой       |   |
| Массовая доля фосфора в пересчете на $\text{P}_2\text{O}_5$ , % | $60 \pm 1$                                    | $61 \pm 1$     | 60,42   |
| Массовая доля азота, %  | $12 \pm 1$                                    | $12 \pm 1$     | 12,35   |
| Массовая доля фтора ( $\text{F}^-$ ), %, не более               | Не нормируется                                | 0,02           | 0,01  |
| Массовая доля нерастворимого в воде остатка, %, не более        | 0,40  | Не нормируется | 0,04  |
| Количество мышьяка (As), ppm                                    | Не нормируется                                | 10,00          | 7,55  |
| Количество свинца (Pb), ppm                                     | 10,00   | 10,00          | 9,18  |
| Количество кадмия (Cd), ppm                                     | Не нормируется                                | 0,40           | 0,23  |
| Количество ртути (Hg), ppm                                      | Не нормируется                                | 0,10           | 0,10  |

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. На основании результатов исследования составов различных видов фосфатного сырья для получения ЭФК установлено значительное перераспределение количественного содержания фосфорсодержащих минералов, в частности фторапатита и карбонатфторапатита. Несмотря на близость вещественного состава исследованных марок марокканских фосфоритов, соотношение основных фосфорсодержащих фаз существенно отличается. Указанные различия в содержании минералов в фосфатном сырье напрямую определяют технологический режим его кислотной переработки, а также оказывают влияние на фазовое распределение основных ионогенных примесей [1–А, с. 67–82; 2–А; 3–А].

2. Новые научные данные о фазовом распределении примесей фторидов, сульфатов, оксидов щелочных, щелочноземельных и поливалентных металлов, тяжелых металлов и мышьяка в системе  $\text{CaSO}_4 - \text{H}_3\text{PO}_4 - \text{H}_2\text{O}$  при производстве ЭФК, а также на стадии ее упарки на лабораторной установке и в условиях действующего производства в зависимости от вида применяемого фосфатного сырья. Установлено, что различия в минералогическом составе сырья, в частности, форме содержания соединений фосфора, фтора и кремния приводят к существенному изменению фазового распределения фтора, а также процесса выделения его в газовую фазу в целом. Несмотря на существенный разброс количества сульфатов в отдельных видах фосфатного сырья от 0,10 до 1,19 мас. %, их содержание в ЭФК варьируется незначительно от 1,68 до 2,03 мас. %, что свидетельствует о том, что их остаточное содержание определяется растворимостью сульфата кальция в жидкой фазе в частности, на стадии кислотного разложения. Суммарное количество оксидов железа и алюминия, переходящих в жидкую фазу, составляет от 3,46 до 3,52 мас. %, что является положительным фактором при последующей переработке ЭФК с точки зрения протекания нежелательных процессов ретроградации [2–А].

3. Теоретически обосновано минимальное остаточное содержание фтора, достигаемое в процессе обесфторивания ЭФК методом осаждения с использованием натрийсодержащих реагентов, на основе экспериментально установленных данных растворимости гексафторсиликата натрия в системе  $\text{Na}_2\text{SiF}_6 - \text{H}_3\text{PO}_4 - \text{H}_2\text{O}$  в изотермическом и политермическом режимах в интервале изменения температуры 20–80°C и содержания ортофосфорной кислоты 40–65 мас. %, что явилось основанием для последующего выбора оптимальных условий осуществления технологического процесса [5–А; 6–А].

4. Разработаны оптимальные составы осадительных композиций на основе натрийсодержащих реагентов в зависимости от вида исходного фосфорсодержащего сырья и состава фосфорной кислоты, обеспечивающие снижение остаточного содержания фтора на стадии реагентной очистки с

0,263–1,800 до 0,040–0,072 мас. %, а также минимальное остаточное содержание тяжелых металлов и мышьяка [4–А; 10–А; 15–А].

5. Доказано, что лимитирующей стадией очистки ЭФК является стадия осаждения и выделения осадка. В интервале осаждения 0,1–1 ч протекает массовая кристаллизация и агрегирование мелких кристаллов гексафторсиликата натрия размером 3–5 мкм, приобретающих по мере увеличения продолжительности до 48 ч удлиненную форму с пирамидальным габитусом размером 30–40 мкм, что сопровождается возрастанием коэффициента фильтрации с  $9,04 \cdot 10^{-6}$  до  $2,59 \cdot 10^{-5}$  см/с, скорости отстаивания с 0,04 до 0,23 см/мин, снижением конечного объема отстоя с 6,70 до 3,41%. Полученные данные явились основанием введения в технологический процесс стадии старения суспензии [4–А; 10–А; 15–А].

6. Разработана методика количественного определения содержания фтора в составе комплексных соединений в очищенной ортофосфорной кислоте с учетом влияния содержащихся в ней ионогенных примесей, которая явилась теоретическим обоснованием целесообразности дополнительной стадии отдувки с целью достижения более глубокой степени обесфторивания [6–А].

7. Экспериментально установлены оптимальные параметры технологического режима очистки различных видов ЭФК, включающего осаждение ионогенных примесей в составе малорастворимых кремнефторидов щелочных металлов на стадии реагентной очистки с последующей отдувкой фторсодержащих примесей, обеспечивающие снижение остаточного содержания фтора до 0,015–0,043 мас. %. Синергетический эффект комбинирования отдельных методов обусловлен влиянием  $\text{SiO}_2$ , оставшегося в жидкой фазе, что способствует переходу HF в более летучее соединение  $\text{SiF}_4$ , обуславливая повышение степени обесфторивания ЭФК [4–А; 11–А; 15–А].

8. Доказана возможность использования ОЭФК, полученной по разработанной в рамках диссертационных исследований технологии для производства кормовых и технических фосфатов калия и аммония; установлены оптимальные технологические режимы и разработаны эффективные способы получения указанных продуктов, отвечающие нормативным требованиям, предъявляемым к водорастворимым фосфорно-калийным удобрениям, кормовому дигидрофосфату калия, техническому и кормовому дигидрофосфату аммония [13–А; 16–А; 17–А].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1. На основании результатов диссертационных исследований разработана ресурсосберегающая технология комбинированной очистки ЭФК с получением кислоты ортофосфорной очищенной. Производственные испытания, проведенные на ОАО «ГХЗ», подтвердили возможность промышленной реализации разработанной технологии по экспериментально установленным оптимальным технологическим параметрам процесса. По

своим физико-химическим показателям наработанная партия кислоты ортофосфорной очищенной соответствует требованиям разработанных ТУ ВУ 100354659.001-2025.

2. Разработана технология переработки гексафторкремниевого отхода очистки ЭФК с получением технического гексафторсиликата натрия, отвечающего требованиям действующих ТУ 113-08-587-87, ТУ 2621-010-69886968-2013 [8–А].

3. Ожидаемый экономический эффект при организации производства ОЭФК мощностью 10 тыс. т в год (в пересчете на 100%  $P_2O_5$ ) на базе ОАО «ГХЗ» составит 9 635 300 долл. США, или 28 230 500 бел. руб. в год (по курсу на 26.06.2025). Реализация побочного продукта – технического гексафторсиликата натрия, позволит получить дополнительный экономический эффект в размере 690 427 долл. США, или 2 048 013 бел. руб. в год (по курсу на 26.06.2025).

4. Разработаны технологические схемы получения очищенной экстракционной фосфорной кислоты на основе комбинированной очистки ЭФК, технического гексафторсиликата натрия на основе указанного отхода, а также кормовых и технических фосфатов калия и фосфатов аммония на основе ОЭФК [8–А; 13–А; 14–А]. Новизна и приоритет разработанных технологий защищены 1 патентом и 2 заявками на изобретения [15–А; 16–А; 17–А].

5. Разработана нормативно-техническая документация для организации промышленного выпуска опытных партий продукции: технические условия ТУ ВУ 100354659.001-2025; лабораторно-технологические регламенты ЛТР РБ 100354659.025-2025; ЛТР РБ 100354659.026-2025. Получены акты наработки лабораторных партий кислоты ортофосфорной очищенной и гексафторсиликата натрия технического, а также заключение о возможности изготовления технического монокалийфосфата.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

### *Монография*

1–А. Физико-химические основы и технологии получения новых видов комплексных удобрений / О. Б. Дормешкин, А. Н. Гаврилюк, Д. В. Черняков, М. С. Мохорт. – Мн. : Бел. гос. технол. ун-т, 2024. – 346 с.

*Статьи в научных изданиях, включенных в перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертаций, и иностранном научном издании*

2–А. Влияние видов фосфатного сырья на распределение примесей в системе  $\text{CaSO}_4 - \text{H}_3\text{PO}_4 - \text{H}_2\text{O}$  при получении ортофосфорной кислоты / О. Б. Дормешкин, А. Н. Гаврилюк, М. С. Мохорт, А. А. Бышик // Труды БГТУ. Серия 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. – 2024. – № 2. – С. 106–114.

3–А. Физико-химические особенности кислотного разложения и получения экстракционной фосфорной кислоты на основе марокканских фосфоритов / О. Б. Дормешкин, А. Н. Гаврилюк, М. С. Мохорт, А. А. Бышик // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя хімічных навук. – 2024. – Т. 60, № 2. – С. 153–161.

4–А. Исследование процесса обесфторивания экстракционной фосфорной кислоты комбинированным методом / О. Б. Дормешкин, А. Н. Гаврилюк, М. С. Мохорт, А. А. Бышик // Химическая промышленность сегодня. – 2024. – № 6. – С. 19–28.

5–А. Исследование растворимости гексафторсиликата натрия в системе  $\text{Na}_2\text{SiF}_6 - \text{H}_3\text{PO}_4 - \text{H}_2\text{O}$  / О. Б. Дормешкин, М. С. Мохорт, А. Н. Гаврилюк [и др.] // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя хімічных навук. – 2025. – Т. 61, № 3. – С. 237–245.

6–А. Проблема определения содержания комплексных фторсодержащих соединений в экстракционной фосфорной кислоте и новый подход к ее решению / О. Б. Дормешкин, М. С. Мохорт, А. Н. Гаврилюк, А. И. Клындюк // Труды БГТУ. Серия 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. – 2025. – № 2. – С. 65–72.

*Статьи в других научных журналах и сборниках конференций*

7–А. Комплексообразование в растворах экстракционной фосфорной кислоты / М. С. Мохорт, А. А. Бышик, О. Б. Дормешкин, А. Н. Гаврилюк // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. – 2024. – Т. 15, № 1. – С. 297–301.

8–А. Получение технического гексафторсиликата натрия из отхода очистки экстракционной фосфорной кислоты / М. С. Мохорт, О. Б. Дормешкин,

А. А. Бышик, А. Н. Гаврилюк // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. – 2025. – Т. 16, № 4. – С. 90–94.

### *Материалы конференций*

9–А. Исследование особенностей обесфторивания экстракционной фосфорной кислоты / М. С. Мохорт, О. Б. Дормешкин, А. Н. Гаврилюк, А. А. Бышик // Материалы V Международного научно-технического форума по химическим технологиям и нефтегазопереработке, Минск, 2–4 нояб. 2022 г. / Бел. гос. технол. ун-т; редкол.: И. В. Войтов [и др.]. – Мн., 2022. – С. 64–68.

10–А. Комплексная очистка экстракционной фосфорной кислоты методом осаждения / О. Б. Дормешкин, А. Н. Гаврилюк, М. С. Мохорт, А. А. Бышик // Сборник научных статей XXVII Международной научно-практической конференции «Инновация-2023», 2023 г., г. Ташкент / Ташкентский техн. ун-т им. И. Каримова [и др.]; редкол.: А. А. Кадыров (гл. ред.). – Ташкент, 2023. – С. 294–297.

11–А. Особенности очистки экстракционной фосфорной кислоты от фторсодержащих соединений комбинированным методом / М. С. Мохорт, А. А. Бышик, О. Б. Дормешкин, А. Н. Гаврилюк // Перспективы развития инновационных технологий производства неорганических веществ и материалов в условиях глобализации : сб. ст. респ. науч.-практ. конф., 9–10 нояб. 2023 г., г. Ташкент / Ташкентский хим.-технолог. ин-т.; редкол.: А. У. Эркаев [и др.]. – Ташкент, 2023. – С. 389.

12–А. Комплексные соединения в экстракционной фосфорной кислоте / М. С. Мохорт, О. Б. Дормешкин, А. Н. Гаврилюк, А. А. Бышик // Материалы VII Международный научно-технический форум по химическим технологиям и нефтегазопереработке, Минск, 13–15 ноября 2024 г. / Бел. гос. технол. ун-т; редкол.: И. В. Войтов [и др.]. – Мн., 2024. – С. 165–168.

13–А. Способ получения кормового и технического дигидрофосфата аммония из очищенной экстракционной фосфорной кислоты / М. С. Мохорт, О. Б. Дормешкин, Н. А. Трибуш // Сборник научных статей XXIX Международной научно-практической конференции «Инновация-2025», 2025 г., г. Ташкент / Ташкентский техн. ун-т им. И. Каримова [и др.]; редкол.: А. А. Кадыров (гл. ред.). – Ташкент, 2025. – С. 124–126.

14–А. Исследование и разработка комбинированной технологии получения очищенной ортофосфорной кислоты / М. С. Мохорт, О. Б. Дормешкин, А. Н. Гаврилюк // Материалы VIII Международный научно-технический форум по химическим технологиям и нефтегазопереработке, Минск, 3–5 декабря 2025 г. / Бел. гос. технол. ун-т; редкол.: С. А. Касперович [и др.]. – Мн., 2025. – С. 44–47.

### *Патенты, заявки на изобретения*

15–А. Патент ВУ 24705, МПК С01В 25/234 (2006.01). Способ очистки упаренной экстракционной фосфорной кислоты : № а 20240051 : заявлено

15.09.2025 : / Дормешкин О. Б., Гаврилюк А. Н., Мохорт М. С., Бышик А. А. ; заявитель Бел. гос. технол. ун-т. – URL: <https://publish.ncip.by/index.php?bul=inv&pref=inv&page=2&year=2025&publ=2025-09-05T00:00:00Z&num=5> (дата обращения: 12.11.2025)

16–А. Заявка ВУ № а 20250194, МПК С01 В 25/30 (2006.01). Способ получения монокалийфосфата : заявлено 03.09.2025 / Дормешкин О. Б., Гаврилюк А. Н., Мохорт М. С., Трибуш Н. А. ; заявитель Бел. гос. технол. ун-т.

17–А. Заявка ВУ № а 20250211, МПК С01 В 25/28 (2006.01). Способ получения очищенного моноаммонийфосфата из экстракционной фосфорной кислоты : заявлено 24.09.2025 / Дормешкин О. Б., Мохорт М. С., Гаврилюк А. Н., Бышик А. А., Войтов И. В., Трибуш Н. А. ; заявитель Бел. гос. технол. ун-т.

A handwritten signature in black ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke extending to the right.

## РЭЗІЮМЭ

Мохарт Марк Сяргеевіч

### Тэхналогія ачысткі экстракцыйнай фосфарнай кіслаты і атрымання кармавых, тэхнічных фасфатаў

**Ключавыя словы:** экстракцыйная фосфарная кіслата, фтор, растваральнасць, ачыстка, асаджэнне, адзіманне, адыход, гексафторсілікат натрыю, кармавы фасфат, тэхнічны фасфат

**Мэта даследавання** – вывучэнне фізіка-хімічных працэсаў, якія праходзяць пры ачыстцы ЭФК ад іёнагенных прымесяў  $F^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $SiF_6^{2-}$ ,  $Me^{n+}$  з улікам асаблівасцяў розных відаў зыходнай фасфатнай сыравіны, устанаўленне найбольш аптымальных тэхналагічных рэжымаў і распрацоўка тэхналогіі ачысткі ЭФК з атрыманнем на яе аснове імпартазамышчальных відаў прадукцыі.

**Метады даследавання і выкарыстаная апаратура:** колькасны хімічны аналіз, тэрмагравіметрыя (TGA/DSC-1/1600), аптычныя (сканіруючы электронны мікраскоп JSM-5610LV з сістэмай JED 22-01, ІЧ-Фур'е-спектрометр Nicolet iN 10, дыфрактометр D8 Advance, спектрафатометр SP 8 200, атамна-эмісійны спектрометр Avivo 200).

**Атрыманя вынікі і іх навізна.** Новыя навуковыя даныя аб фазавым размеркаванні іёнагенных прымесяў у сістэме  $CaSO_4 - H_3PO_4 - H_2O$  у вытворчасці ЭФК пры перапрацоўцы розных відаў фасфатнай сыравіны; эксперыментальна ўсталяваныя даныя растваральнасці гексафторсілікату натрыю ў сістэме  $Na_2SiF_6 - H_3PO_4 - H_2O$  у ізатэрмічным і політэрмічным рэжымах у шырокім інтэрвале змены тэмпературы і канцэнтрацыі ортафосфарнай кіслаты; метадыка колькаснага вызначэння ўтрымання фтору ў складзе комплексных злучэнняў у растворах вычышчанай ортафосфарнай кіслаты з улікам уплыву іёнагенных прымесяў; распрацаваны тэхналогіі камбінаванай ачысткі ЭФК з атрыманнем вычышчанай ортафосфарнай кіслаты і тэхнічнага гексафторсілікату натрыю на аснове адыходаў ачысткі ЭФК, а таксама кармавых і тэхнічных фасфатаў калію, фасфатаў амонію – на аснове АЭФК.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні.** Тэхналогію камбінаванай ачысткі экстракцыйнай фосфарнай кіслаты мэтазгодна выкарыстоўваць для вытворчасці кармавых і тэхнічных фасфатаў, водарастваральных бясхлорных комплексных угнаенняў па распрацаваных тэхналогіях.

**Галіна выкарыстання:** прадпрыемствы па вытворчасці экстракцыйнай фосфарнай кіслаты і фосфарзмяшчальных мінеральных угнаенняў.

## РЕЗЮМЕ

Мохорт Марк Сергеевич

### Технология очистки экстракционной фосфорной кислоты и получения кормовых, технических фосфатов

**Ключевые слова:** экстракционная фосфорная кислота, фтор, растворимость, очистка, осаждение, отдувка, гексафторсиликат натрия, кормовой фосфат, технический фосфат

**Цель исследования** – изучение физико-химических процессов, протекающих при очистке ЭФК от ионогенных примесей  $F^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $SiF_6^{2-}$ ,  $Me^{n+}$  с учетом особенностей различных видов исходного фосфатного сырья, установление наиболее оптимальных технологических режимов и разработка технологии очистки ЭФК с получением на ее основе импортозамещающих видов продукции – кормовых и технических фосфатов.

**Методы исследования и использованная аппаратура:** количественный химический анализ, термогравиметрия (TGA/DSC-1/1600), оптические (сканирующий электронный микроскоп JSM – 5610LV с системой JED 22-01, ИК-Фурье-спектрометр Nicolet iN 10, дифрактометр D8 Advance, спектрофотометр SP 8001, атомно-эмиссионный спектрометр Avivo 200).

**Полученные результаты и их новизна.** Новые научные данные о фазовом распределении ионогенных примесей в системе  $CaSO_4 - H_3PO_4 - H_2O$  в производстве ЭФК при переработке различных видов фосфатного сырья; экспериментально установленные данные растворимости гексафторсиликата натрия в системе  $Na_2SiF_6 - H_3PO_4 - H_2O$  в изотермическом и политермическом режимах в широком интервале изменения температуры и концентрации ортофосфорной кислоты; методика количественного определения содержания фтора в составе комплексных соединений в растворах очищенной ортофосфорной кислоты с учетом влияния ионогенных примесей; разработаны технологии комбинированной очистки ЭФК с получением очищенной ортофосфорной кислоты и технического гексафторсиликата натрия на основе отходов очистки ЭФК, а также кормовых и технических фосфатов калия, фосфатов аммония – на основе ОЭФК.

**Рекомендации по использованию.** Технологию комбинированной очистки экстракционной фосфорной кислоты целесообразно использовать для производства кормовых и технических фосфатов, водорастворимых бесхлорных комплексных удобрений по разработанным технологиям.

**Область применения:** предприятия по производству экстракционной фосфорной кислоты и фосфорсодержащих минеральных удобрений.

## SUMMARY

Mark S. Mokhart

### Technology for purification of wet-process phosphoric acid and feed, technical phosphate production

**Keywords:** wet-process phosphoric acid, fluorine, solubility, purification, precipitation, stripping, waste, sodium hexafluorosilicate, feed phosphate, technical phosphate

**The purpose of the study** – study of the physicochemical processes involved in the purification of phosphate concentrate from ionogenic impurities  $F^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $SiF_6^{2-}$ ,  $Me^{n+}$  considering the characteristics of various types of initial phosphate raw materials, establishing the most optimal process modes and developing a technology for purifying phosphate concentrate with the production of import-substituting products such as feed and technical phosphates.

**Research methods and used equipment:** quantitative chemical analysis, thermogravimetry (TGA/DSC-1/1600), optical (scanning electron microscope JSM – 5610LV with JED 22-01 system, IR Fourier spectrometer Nicolet iN 10, diffractometer D8 Advance, spectrophotometer SP 8001, atomic emission spectrometer Avivo 200).

**The obtained results and their novelty.** New scientific data has been obtained regarding the phase distribution of ionogenic impurities in the  $CaSO_4 - H_3PO_4 - H_2O$  system during the production of wet-process phosphoric acid from various phosphate raw materials; experimentally determined established data for sodium hexafluorosilicate in the  $Na_2SiF_6 - H_3PO_4 - H_2O$  system were established under isothermal and polythermal conditions, across a wide range of temperature and phosphoric acid concentration; a method for the quantitative determination of fluorine content in complex compounds within purified phosphoric acid solutions has been developed, accounting for the influence of ionogenic impurities; technologies have been developed for the combined purification of wet-process phosphoric acid to produce purified orthophosphoric acid and technical sodium hexafluorosilicate from wet-process phosphoric acid waste, and also feed and technical potassium phosphates, and ammonium phosphates – based on purified wet-process phosphoric acid.

**Recommendations for use.** Combined purification technology for wet-process phosphoric acid is suitable for the production of feed and technical phosphates, as well as water-soluble, chlorine-free complex fertilizers using developed technologies.

**Application area:** Plants producing wet-process phosphoric acid and phosphorus-containing mineral fertilizers.

Научное издание

**Мохорт** Марк Сергеевич

**ТЕХНОЛОГИЯ ОЧИСТКИ  
ЭКСТРАКЦИОННОЙ ФОСФОРНОЙ КИСЛОТЫ  
И ПОЛУЧЕНИЯ КОРМОВЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ ФОСФАТОВ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук по специальности  
05.17.01 – Технология неорганических веществ

Ответственный за выпуск М.С. Мохорт

Подписано в печать 17.04.2026. Формат 60×84<sup>1/16</sup>.  
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать ризографическая.  
Усл. печ. л. 1,6. Уч.-изд. л. 1,0.  
Тираж 60 экз. Заказ 1.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
УО «Белорусский государственный технологический университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/227 от 20.03.2014.  
Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.