

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЕСФТОРИВАНИЯ ЭКСТРАКЦИОННОЙ ФОСФОРНОЙ КИСЛОТЫ КОМБИНИРОВАННЫМ МЕТОДОМ

{ Дормешкин О. Б., Гаврилюк А. Н. Мохорт М. С., Бышик А. А.
Белорусский государственный технологический университет, Минск. }

Представлены результаты исследований, целью которых явилось изучение процесса обесфторивания экстракционной фосфорной кислоты комбинированным методом, с учетом различий в составе фосфорных кислот, произведенных из различных видов фосфатного сырья. Результаты выполненного комплекса исследований позволили установить эффективные параметры ведения отдельных технологических стадий процесса обесфторивания ЭФК: приготовления осадительной суспензии, осаждения, фильтрации и отмывки осадка, отдувки кислоты, при которых остаточное содержание фтора в очищенной кислоте варьировалось от 0,015 до 0,043 % в зависимости от вида исходного сырья. Данные показатели сопоставимы с нормативными требованиями к очищенной технической ортофосфорной кислоте, производимой рядом российских и зарубежных компаний и обеспечивают возможность последующего использования очищенной кислоты для получения большинства видов кормовых и технических фосфатов. Установлено, что лимитирующей стадией реагентной очистки является процесс роста кристаллов гексафторсиликата натрия и последующего отделения образующегося осадка. Показано, что отличия в химическом и минералогическом составе исходных фосфатных руд для получения ЭФК предопределяют различия в выборе параметров технологического режима отдельных стадий очистки.

Ключевые слова: экстракционная фосфорная кислота, фтор, фосфатные руды, минералогический состав, полуторные оксиды, примеси, очистка, осаждение, отдувка, эффективные условия

Благодарность: работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований «Химические процессы, реагенты и технологии, биорегуляторы и биоорганомия», задание 2.1.9 (НИР 1).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

STUDY OF THE PROCESS OF DEFLUORINATION OF WET-PROCESS PHOSPHORIC ACID BY COMBINED METHOD

O. B. Dormeshkin, A. N. Haurlyiuk, M. S. Mokhart, A. A. Byshyk.
Belarusian State Technological University, Minsk.

Abstract: The article presents the results of studies aimed at establishing the physicochemical regularities of defluorination of wet-process phosphoric acid by a combined method, taking into account the differences in the composition of phosphoric acids, produced from various types of phosphate raw materials. The results of the performed set of studies made it possible to establish effective parameters for the conduct of individual technological stages of the process of defluorination of wet-process phosphoric acid: preparation of precipitation suspension, precipitation, filtration and washing of sludge, acid stripping, in which the residual fluorine content in purified acid varied from 0.015 to 0.043%, depending on the type of feedstock. These indicators are comparable to the regulatory requirements for purified technical orthophosphoric acid produced by a number of Russian and foreign companies and provide the possibility of subsequent use of purified acid for the production of most types of feed and technical phosphates. It has been established that the limiting stage of the chemical purification of the process stage of growth of sodium hexafluorosilicate crystals and the subsequent wet-process phosphoric acid ration of the formed precipitate. It is shown that differences in the chemical and mineralogical composition of the initial phosphate ores for the production of wet-process phosphoric acid predetermine the differences in the choice of the technological parameters of individual stages treatment.

Keywords: wet-process phosphoric acid, fluorine, phosphate raw materials, mineralogical composition, sesquioxides, impurities, cleaning, sedimentation, stripping, effective conditions.

Введение

Известно, что фосфорная кислота является второй по объемам потребления неорганической кислотой в мире после серной кислоты. Ее мировое производство в 2024 году оценивается в 92,98 млн тонн и продолжает динамично развиваться [1]. Если в 2020 году объем мирового рынка фосфорной кислоты составлял 31,67 миллиарда, то к 2029 году, по прогнозам экспертов, достигнет 47,06 миллиарда долларов США, при среднегодовом темпе роста – 4,5 % [2]. Так, на предприятиях ФосАгро (Россия) в 2023 г. производство фосфорной кислоты впервые в истории превысило 3 млн тонн [3]. Ключевыми игроками рынка фосфорной кислоты сегодня выступают Nutrien Ltd. (Канада), ICL (Израиль), OCP Group (Марокко), Yara International (Норвегия), EuroChem Group и ФосАгро (Россия), Prayon SA (Бельгия), JR Simplot и Бренntag Норт Америка (США), SECA ARKEMA GROUP (Франция) и ряд других [4]. Наряду с сельскохозяйственными удобрениями, на долю которых приходится около 60% общей выручки, значительный вклад в увеличение темпов производства кислоты вносит пищевая (напитки, продукты питания, молочные продукты) и фармацевтическая промышленность. Фосфорная кислота является

неотъемлемой частью строительного сектора. Ее роль в улучшении свойств бетона и повышении долговечности согласуется с растущей потребностью в прочных и устойчивых конструкциях [4]. Однако производство фосфорной кислоты переживает значительные изменения связанные со снижением производства термической фосфорной кислоты (ТФК) и увеличением выпуска технических и пищевых фосфорсодержащих солей на основе более дешевой экстракционной фосфорной кислоты (ЭФК).

Действующие в СНГ и зарубежных странах требования к кормовым и техническим фосфатам, пищевым солям предъявляют жесткие ограничения по содержанию фторидов, сульфатов, полуторных оксидов и ряду других примесей, что потребовало разработки новых методов и технологий очистки ЭФК. Одной из наиболее нежелательных примесей в ЭФК являются фторид-ионы, поэтому основной и определяющей стадией в процессе очистки является снижение их содержания. Поскольку ЭФК является полупродуктом для получения различных фосфорсодержащих продуктов, то определяющим критерием глубины и степени удаления фторид-ионов из кислоты являются требования по содержанию фтора в конечных продуктах. Как показал анализ нормативных требований,

ТАБЛИЦА 1А
ТРЕБОВАНИЯ ПО СОДЕРЖАНИЮ ФТОРА ДЛЯ КОРМОВЫХ ФОСФАТОВ

Наименование показателя	Монокальцийфосфат ГОСТ 23999-80 1-й сорт	Дикальцийфосфат (преципитат) ГОСТ 23999-80	Трикальцийфосфат ГОСТ 23999-80 Высший сорт	Моноаммонийфосфат ТУ 2148-001-48590531-02 Марка А	Диаммонийфосфат ГОСТ 8515-75	Мононатрийфосфат ТУ 2182-002-0685486-2009	Тринатрийфосфат ГОСТ 201-76	Монокалийфосфат ТУ 10.91.10-101-32496445-2020
Массовая доля фтора, %, не более	0,2	0,1	0,2	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

ТАБЛИЦА 1Б
ТРЕБОВАНИЯ ПО СОДЕРЖАНИЮ ФТОРА ДЛЯ КОРМОВЫХ ФОСФАТОВ КАЛЬЦИЯ ИНОСТРАННЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ

Качественные характеристики	Nutrien Ltd		Polifar Group			Mosaic Fertilizantes	
	Monodicalcium Phosphate	Dicalcium Phosphate	White Monodicalcium Phosphate Granule MDCP Feed	White Dicalcium Phosphate Granular/ Powder Feed	Tricalcium Phosphate Powder Feed Grade TCP for Dairy Cattle	Foscacio19	Foscacio 21
Фтор (F), %	≤0,21	≤0.185	≤0.18	≤0.18	≤0.18	≤0.19	≤0.35

ТАБЛИЦА 1В
ТРЕБОВАНИЯ ПО СОДЕРЖАНИЮ ФТОРА ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ФОСФАТОВ АММОНИЯ

Качественные характеристики	ООО «Алмаз Удобрения»	Nutrien Ltd ²	Диаммонийфосфат ГОСТ 8515-75 Марка Б
	Моноаммонийфосфат очищенный (Тех-МАР) ТУ 2148-001-48590531-02	Моноаммонийфосфат	
Массовая доля фтора, %, не более	0,08	0,24	0,1

предъявляемых к составу кормовых и технических фосфатов различных производителей (табл. 1а – 1в), содержание фтора в них колеблется от 0,05 до 0,35 %. Причем ограничения по содержанию фтора у отечественных производителей более жесткие чем у зарубежных аналогичных продуктов. Выполненные расчеты расходных норм по сырью показали, что для получения кормовых фосфатов аммония с остаточным содержанием фтора не более 0,05 % (табл. 1а), допустимое его содержание в очищенной ЭФК должно составлять 0,058 %, а для фосфатов кальция с содержанием фтора 0,2 % – 0,24 % для монокальцийфосфата и 0,316 % для трикальцийфосфата. Таким образом, для получения технических и кормовых фосфатов применение фосфорной кислоты пищевой квалификации, а также очищенной ЭФК российских производителей марки «улучшенная» (ТУ 2142-002-00209450-96) либо марки «Т4» (ТУ 2121-681-00209438-05), содержащих до 0,005 % фтора экономически не целесообразно. Как показано выше, для получения технических и кормовых фосфатов применяемые для очистки методы должны обеспечивать остаточное содержание фтора до 0,05 %.

Среди известных способов очистки ЭФК наибольшее промышленное применение получили: очистка органическими растворителями, концентрирование до полифосфорной кислоты, отдувка фтористых соединений паром, воздухом или паровоздушной смесью, концентрирование кислоты с введением активных кремнийсодержащих реагентов, осаждение в виде труднорастворимых кремнефторидов калия и натрия, ряд других [5–18]. Каждый из указанных методов имеет свои преимущества и недостатки. Так, использование органических реагентов, как отмечают авторы [12], хотя и позволяют обеспечить глубокую очистку ЭФК от фтора, однако сопряжено с проблемой использования фторсодержащих осадков, а технология характеризуется повышенной пожаро- и взрывоопасностью, токсичностью многих органических экстрагентов, что ограничивает использование конечных продуктов в животноводстве и медицине. Использование пара и паровоздушной смеси предполагает значительное повышение рабочих температур, повышенную коррозию, необходимость применения пароперегревательных установок и возможность образования полифосфорной кислоты. Осаждение в виде труднорастворимых соединений не обеспечивает глубокую очистку (остаточное содержание фтора составляет 0,4–0,5 %) [12]. Как отмечают большинство авторов, наибольший эффект достигается при комбинации отдельных методов, в частности, осаждении в виде труднорастворимых соединений на первой стадии и отдувке газообразными теплоносителями на второй стадии. Однако имеющиеся данные в области очистки ЭФК методами осаждения и отдувки получены для ЭФК на основе конкретных видов фосфатного сырья и не позволяют сделать однозначный вывод об наиболее рациональных условиях проведения процесса для кислот, получаемых на основе иных видов сырья, в виду значительных отличий в их химическом и минералогическом составе, а также особенностей технологического процесса.

С учетом изложенного авторами выполнен комплекс исследований, целью которых явилось изучение процесса обесфторивания экстракционной фосфорной кислоты комбинированным методом, с учетом различий в составе фосфорных кислот, получаемых на основе различных видов фосфатного сырья.

Методика эксперимента и методы исследования

В качестве исходного сырья использовали следующие образцы ортофосфорной кислоты:

- экстракционная фосфорная кислота (ЭФК), произведенная из фосфоритов Марокко на ОАО «Гомельский химический завод»;
- упаренная экстракционная фосфорная кислота (УЭФК), произведенная из фосфоритов Марокко на ОАО «Гомельский химический завод»;
- упаренная экстракционная фосфорная кислота (УЭФК), произведенная из Кировского апатитового концентрата на АО «ФосАгро» (Россия).

Для проведения количественных анализов при идентификации состава исходную кислоту, а также пробы, отбираемые на отдельных стадиях, анализировали на содержание соответствующих элементов с использованием стандартных методов [19, 20]. За результат анализа принимали среднее арифметическое параллельных определений, допускаемые расхождения между которыми не превышали 0,2–0,5 % при доверительной вероятности $P = 0,95$. Рентгенофазовый анализ проводили с использованием рентгеновского дифрактометра «D8 Advance» фирмы «Bruker» (США). При расшифровке рентгенограмм использовали базу данных [21].

Как видно из данных химического анализа основными примесями в составе ЭФК являются соединения фтора, железа, алюминия, магния, кальция, натрия, калия, кремния и серы табл. 2. Помимо основных примесей в фосфорной кислоте, в незначительных количествах, содержатся тяжелые металлы (марганец, никель, цинк), соединения титана, хлора и органических веществ. Поскольку стадия упарки ЭФК сопровождается удалением соединений фтора в газовую фазу, его содержание в упаренной кислоте закономерно значительно ниже.

ТАБЛИЦА 2
ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА КИСЛОТЫ

Компоненты	Содержание, мас. %		
	ЭФК (Марокко)	УЭФК (Марокко)	УЭФК (Кировск)
P ₂ O ₅	22,640	48,000	49,088
F–	1,800	0,263	0,310
CaO	0,289	0,179	0,257
MgO	0,095	0,173	0,188
Fe ₂ O ₃	1,590	0,272	1,600
Al ₂ O ₃	1,635	0,253	0,987
K ₂ O	0,098	0,019	0,108
Na ₂ O	0,328	0,049	0,168
SO ₄ ^{2–}	3,350	2,937	2,867
SiO ₂	0,734	0,085	0,137
TiO ₂	0,128	0,164	0,087
MnO	0,037	0,071	0,042
NiO	0,074	0,114	0,087
ZnO	0,022	0,049	0,037
Cl–	0,012	0,024	–

Процесс очистки ЭФК и УЭФК реагентным методом включает следующие стадии:

- приготовление осадительной суспензии;
- химическое взаимодействие с образованием и последующим осаждением кристаллов гексафторсилката натрия;
- отделение труднорастворимого осадка от ОЭФК фильтрацией с последующей отмывкой.

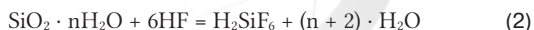
Основными варьируемыми параметрами, определяющими эффективность обесфторивания, являются: соотношение жидкого стекла и соды к исходному содержанию фтора в кислоте, соотношение вода : жидкое стекло, продолжительность стадии роста кристаллов.

В качестве осадительного реагента использовалась суспензия, приготовленная путем смешивания жидкого стекла, разбавленного водой до соотношения 1 : (0–5), взятого в соотношении SiO_2 : F равному 50–180 мас. % от стехиометрии, соды, взятой в количестве 100–220 мас. % от стехиометрического, фосфорной кислоты 20 мас. % от массы исходной ЭФК. Основными контролируемыми параметрами являлись следующие количественные характеристики: содержание фтора в очищенной кислоте, степень обесфторивания, степень отмывки осадка.

В процессе приготовления осадительного реагента происходят следующие реакции:



присутствие активной кремнекислоты облегчает последующее образование кремнефторида натрия и повышает общую степень удаления фтора в осадок:



при введении соды образуется дигидрофосфат натрия:



На стадии приготовления осадительного реагента температура составляет 70 °С, а время – 60 мин. Дозировка соды составляет 100–220 % от стехиометрии на образование кремнефторида натрия по реакции:

ТАБЛИЦА 3

ЗАВИСИМОСТЬ ОСТАТОЧНОГО СОДЕРЖАНИЯ ФТОРА В ЭФК (МАРОККО) ОТ СОДЕРЖАНИЯ ЖИДКОГО СТЕКЛА

Содержание фтора в исходной ЭФК, мас. %	Количество вводимых реагентов, мас. %		Остаточное содержание фтора, мас. %	Степень обесфторивания, %
	Сода	Жидкое стекло		
1,800	100	50	0,239	86,74
1,800	100	100	0,182	89,90
1,800	100	110	0,168	90,66
1,800	100	130	0,166	90,81
1,800	100	150	0,176	90,22
1,800	100	170	0,164	90,89
1,800	100	180	0,174	90,33



Количество вводимой соды и жидкого стекла рассчитывалось исходя из общего расхода ЭФК на обесфторивание. Введение стадии предварительного приготовления осадительной суспензии позволило получить более крупные кристаллы гексафторсилката натрия, повысить скорость и полноту выделения соединений фтора в осадок.

На второй стадии осадительная суспензия смешивается с основным количеством ЭФК, составляющим 80 мас. % от общего количества и перемешивается 60 мин при температуре 80–90 °С.

Основное количество фтора связывается в гексафторсилкат натрия и выделяется в твердую фазу:



Различия содержания диоксида кремния в составе исходных кислот объясняет различия соотношения SiO_2 : F на стадии приготовления осадительной суспензии. Так если для ЭФК (Марокко) и УЭФК (Кировск) исходное соотношение диоксида кремния к фтору составляет 0,41–0,44, а для УЭФК (Марокко) 0,32, что, в свою очередь, обуславливает более высокий расход жидкого стекла.

Результаты и их обсуждение

Первая серия экспериментов проведена при соотношении SiO_2 : F равном 50–180 мас. % от стехиометрического количества на содержание фтор-ионов и постоянном количестве соды, равном 100 мас. %, при температуре осаждения 80–90 °С, при продолжительности отстаивания 24 часа.

Результаты исследований показали, что увеличение норм расхода осадительных реагентов приводит к повышению степени очистки экстракционных фосфорных кислот от соединений фтора до определенного предела. Так минимальное остаточное содержание фтора для ЭФК (Марокко) – 0,166–0,168 мас. % достигается при норме расхода жидкого стекла 120 мас. % (табл. 3). Количество

ТАБЛИЦА 4

ЗАВИСИМОСТЬ ОСТАТОЧНОГО СОДЕРЖАНИЯ ФТОРА В ЭФК (МАРОККО) ОТ СОДЕРЖАНИЯ СОДЫ

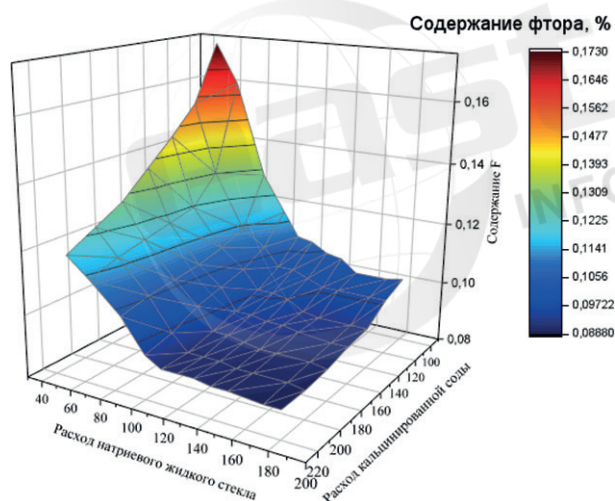
Содержание фтора в исходной ЭФК, мас. %	Количество вводимых реагентов, мас. %		Остаточное содержание фтора, мас. %	Степень обесфторивания, %
	Сода	Жидкое стекло		
1,800	100	120	0,159	91,15
1,800	120	120	0,138	92,31
1,800	140	120	0,114	93,65
1,800	160	120	0,110	93,88
1,800	180	120	0,111	93,85
1,800	200	120	0,110	93,88
1,800	220	120	0,105	94,17

вводимой соды для ЭФК (Марокко) составило 140 мас. %. Дальнейшее увеличение количества соды от 140 до 220 мас. % нецелесообразно поскольку приводит лишь к незначительному снижению остаточного содержания фтора с 0,114 до 0,105 мас. % (табл. 4). Это объясняется тем, что реакционная суспензия взаимодействует с соединениями фтора представленными анионами F^- , SiF_6^{2-} , а также свободными фтороводородной и гексафторкремневой кислотами (реакции 4-5). Тогда как часть фтора присутствует в кислоте в составе комплексных соединений типа AlF_{3-x}^{x-} ($x = 1 - 6$), снижающих упругость паров фтористых соединений над ЭФК и замедляющих процесс ее обесфторивания [12, 13].

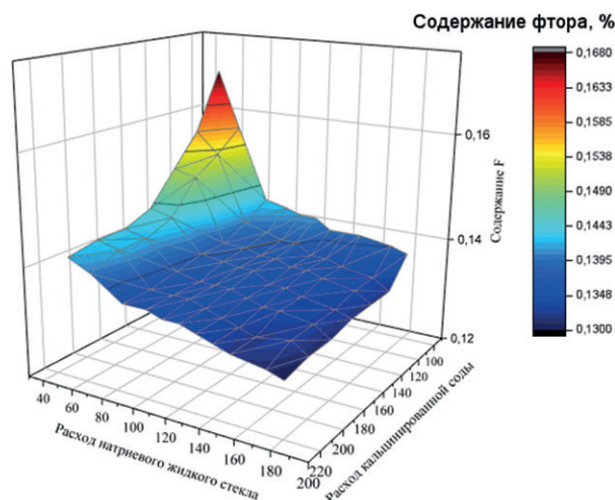
Исследование влияния соотношения осадительных реагентов для обесфторивания УЭФК (Марокко) и УЭФК (Кировск) проводилось по аналогичной методики и их результаты представлены на рис. 1.

РИС. 1

ЗАВИСИМОСТЬ ОСТАТОЧНОГО СОДЕРЖАНИЯ ФТОРА ОТ НОРМЫ РАСХОДА РЕАГЕНТОВ



а - УЭФК (Марокко)



б - УЭФК (Кировск)

Норма расхода жидкого стекла для ЭФК из фосфоритов Марокко составляет 120 % от стехиометрии, для УЭФК (Марокко) – 150 %, для УЭФК (Кировск) – 120 %; норма расхода соды для ЭФК (Марокко) – 140 %, УЭФК (Марокко) – 120 %, УЭФК (Кировск) – 140 %. При этом остаточное содержание фтора в ОЭФК составляет 0,114 мас. % для ЭФК (Марокко), 0,098–0,1 мас. % для УЭФК (Марокко) и 0,137–0,138 мас. % для УЭФК (Кировск).

Как показали исследования, а также данные авторов [22], лимитирующей стадией реагентной очистки ЭФК от соединений фтора является стадия роста кристаллов гексафторсиликата натрия и последующего отделения образующегося осадка. Изучение влияния продолжительности процесса отстаивания на рост кристаллов и остаточное содержание фтора в жидкой фазе осуществлялось путем периодического отбора и анализа проб очищаемой ЭФК в течении 10 дней с интервалом 6 часов.

Анализ характера хода кинетических кривых изменения остаточного содержания фтора позволяет условно выделить три зоны: I – 24, II – 36 и III – 60 часов соответственно (рис. 2). Первая зона соответствует процессу образования зародышей кристаллов Na_2SiF_6 , из пересыщенного раствора и характеризуется максимальной скоростью обесфторивания фосфорной кислоты (степень обесфторивания ЭФК (Марокко) – 94,3 %, УЭФК (Марокко) – 76,6 %, УЭФК (Кировск) – 71,9 %). Вторая зона характеризуется ростом кристаллов, ввиду снижения интенсивности кристаллообразования, при этом степень обесфторивания за весь период для ЭФК (Марокко) возрастает до 95,4 %, УЭФК (Марокко) – 81,3 %, УЭФК (Кировск) – 83,5 %. В третьей зоне происходит окончательное формирование кристаллов при незначительном изменении содержания фтора в ОЭФК.

Для достижения максимальной степени обесфторивания продолжительность процесса должна составлять 120 часов. При этом степень обесфторивания составляет: для ЭФК (Марокко) – 95,9 %, для УЭФК (Марокко) – 83,9 %, для УЭФК (Кировск) – 85,6 %.

Суспензии после стадии отстаивания разделялись методом фильтрации с получением ОЭФК и осадка. С целью снижения потерь фосфорной кислоты, осадок отмывался водой. Для снижения перехода фторидов в промывной раствор температура промывной воды составляла 0–5 °C. Отмывка осадка осуществлялась до pH 5–6, средний расход промывной воды составил 30 % от объема очищаемой кислоты для ЭФК (Марокко), и 10 % для УЭФК (Марокко и Кировск), при этом в промывной раствор переходит до 20 % фтора в виде растворенного Na_2SiF_6 .

Как следует из анализа данных о распределении P_2O_5 на стадии фильтрации, степень отмывки осадка составила: для ЭФК (Марокко) 98,10 %, для УЭФК (Марокко и Кировск) 99,40 и 99,36 % соответственно (табл. 5), при этом от 91,87 до 96,17 % фосфора остается в кислоте, что свидетельствует о ее незначительных потерях на стадии фильтрации и отмывки. При осуществлении технологического процесса очистки ЭФК рециркуляция промывного раствора на стадию приготовления осадительной суспензии обеспечит дополнительное снижение потерь фосфора.

Химический анализ состава ОЭФК (табл. 6) показал, что при осуществлении очистки от фторсодержащих соединений методом осаждения в указанных выше условиях с дополнительным введением стадии отстаивания остаточное содержание фтора составляет от 0,040 до 0,072 мас. %, что значительно ниже по сравнению с результатами, достигаемыми при использовании известных способов реагентной очистки [12, 22].

ТАБЛИЦА 5

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ P_2O_5 НА СТАДИИ ФИЛЬТРАЦИИ И ОТМЫВКИ ОСАДКА

Исходная кислота	Остаётся в кислоте, %	Потери с влажным осадком, %	Потери в твёрдую фазу, %	Переходит в промывной раствор, %	Степень отмывки, %
ЭФК Марокко	91,87	8,13	1,80	6,23	98,10
УЭФК Марокко	95,41	4,59	0,60	3,99	99,40
ЭФК Кировск	96,17	3,83	0,64	3,19	99,36

Как показали исследования, существенное влияние на процесс фильтрации ЭФК оказывает количество воды, вводимой на стадии приготовления осадительной суспензии (табл. 7). При поддержании соотношения вода : жидкое стекло равно 1–2 образуются легко фильтруемые кристаллические осадки. При увеличении соотношения до 3 и более наблюдается образование трудно фильтруемых гелеобразных осадков и как следствие отмечается снижение степени обесфторивания и возрастание потерь фосфора в 2–3 раза (с 5,42 до 15,82 %), а также снижение скорости фильтрации.

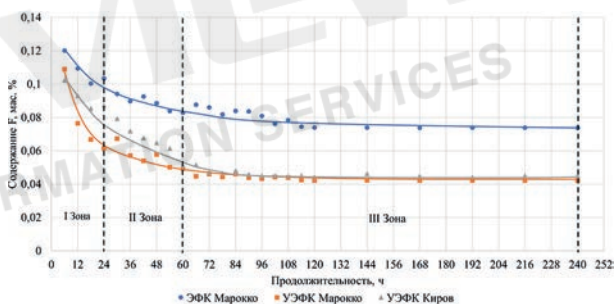
Помимо соединений фтора удаляется ряд других примесей. Так, степень очистки от соединений железа составляет 31,61–41,51 %, алюминия – 31,23–49,85 %. Снижение содержания ионов калия и кальция в составе ОЭФК

обусловлено образованием алюмосиликатов калия и фторида кальция в составе осадка, что подтверждается данными рентгенофазового анализа.

Остаточное содержание фтора в очищенной кислоте и максимально достижимая степень обесфторивания ЭФК ограничены значениями растворимости кремнефторида натрия в данной системе, кроме того, как было отмечено ранее, часть фтора в составе ЭФК и УЭФК присутствует в виде комплексных соединений. Согласно справочным данным растворимость кремнефторида натрия составляет 0,78 г/100 мл H_2O при 25 °С и 1,95 г/100 мл H_2O при 80 °С [23]. Таким образом для достижения более глубокой очистки ЭФК необходимо введение дополнительной стадии доочистки с использованием иных химических либо физико-химических методов.

РИС. 2

ИЗМЕНЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ СОЕДИНЕНИЙ ФТОРА В ОЭФК В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ОТСТАИВАНИЯ



Из известных способов дефторирования фосфорных кислот в качестве второй ступени после основной стадии реагентного обесфторивания метод отдувки представляется наиболее целесообразным [12, 22, 24, 25]. Достоинствами данного способа являются достижение высокой степени обесфторивания, простота технологического

ТАБЛИЦА 6

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ОЧИЩЕННЫХ ЭКСТРАКЦИОННЫХ ФОСФОРНЫХ КИСЛОТ МЕТОДОМ ОСАЖДЕНИЯ

Состав	Содержание, мас. %								
	ЭФК (Марокко)			УЭФК (Марокко)			УЭФК (Кировск)		
	Исходная	Очищенная	Степень очистки, %	Исходная	Очищенная	Степень очистки, %	Исходная	Очищенная	Степень очистки, %
P_2O_5	22,64	23,18	-	48,02	48,010	-	49,088	48,741	-
F	1,800	0,075	95,83	0,263	0,042	84,03	0,310	0,040	87,10
CaO	0,289	0,216	25,26	0,179	0,161	10,06	0,257	0,234	8,95
MgO	0,095	0,099	-	0,173	0,187	-	0,188	0,196	-
Fe_2O_3	1,590	0,930	41,51	0,272	0,186	31,61	1,600	0,978	38,88
Al_2O_3	1,635	0,820	49,85	0,253	0,174	31,23	0,987	0,610	38,20
K_2O	0,098	0,015	84,69	0,019	0,009	52,63	0,108	0,051	52,78
Na_2O	0,328	0,655	-	0,049	0,338	-	0,168	0,452	-
SO_4	3,350	3,314	1,07	2,937	2,908	0,99	2,867	2,829	1,33

процесса и отсутствие необходимости дополнительной упарки кислот, с целью повышения ее концентрации за счет частичной упарки в процессе отдувки. Использование иных известных методов, таких как ионный обмен, ультрафильтрация, применение органических реагентов существенно удорожает конечный продукт в связи с использованием импортных компонентов и усложнением технологического процесса.

Известно, что основными технологическими параметрами, определяющими процесс десорбции в системе Ж-Г, являются: температура, расход газа (воздуха), продолжительность процесса. Температурный режим варьировался от 50 до 120 °С, расход воздуха от 2 до 8 л / мин. Выбор верхнего значения температурного интервала обусловлен тем, что в составе ЭФК и УЭФК помимо фторидов и гексафторсиликатов, фтор входит в состав комплексных соединений с металлами и фосфором, разрушение которых происходит при температурах 110–120 °С, а также переходом ортофосфорной кислоты в полифосфорную при 140–150 °С. При очистке ЭФК произведенной из фосфоритов Марокко общая продолжительность процесса во всех экспериментах составляла 60 мин., при очистке УЭФК – 30 мин. В процессе исследований контролировались следующие количественные и качественные характеристики: содержание фтора и Р₂О₅ в ОЭФК, степень обесфторивания, плотность, цвет, мутность.

ТАБЛИЦА 7
ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ
ВОДА : ЖИДКОЕ СТЕКЛО НА СТЕПЕНЬ
ОБЕСФТОРИВАНИЯ ЭФК (Марокко)

Соотношение вода : жидкое стекло	Содержание F, %	Степень обесфторивания, %	Потери Р ₂ О ₅ с влажным осадком, %
0:1	0,067	96,264	5,42
1:1	0,069	96,013	7,74
2:1	0,071	95,959	9,56
3:1	0,076	95,789	12,29
4:1	0,091	94,961	13,12
5:1	0,122	93,244	15,82

Результаты исследования зависимости остаточного содержания фтора от параметров ведения стадии отдувки позволили установить, что максимальная степень обесфторивания достигается при температуре 110 °С для ЭФК и УЭФК (Марокко) и 100 °С для УЭФК (Кировск), расходе воздуха 6 л/мин для всех видов кислот (рис. 3). Основной кристаллической фазой осадка, полученного при совместной отдувке с упаркой экстракционной фосфорной кислоты является дигидрат сульфата кальция и CaSO₄ · 0,15H₂O. (рис. 4). В то же время в ходе экспериментов отмечено что процессы очистки ЭФК и УЭФК имеют существенные различия. Так в процессе отдувки ЭФК в условиях интенсивного тепломассообмена происходит ее частичная упарка с выпадением кристаллического труднорастворимого осадка, тогда как при очистке УЭФК процессы кристаллообразования в объеме не наблюдаются, однако происходит незначительная инкрустация поверхности реактора.

РИС. 3
ЗАВИСИМОСТЬ СТЕПЕНИ
ОБЕСФТОРИВАНИЯ
ОТ ПАРАМЕТРОВ ОТДУВКИ

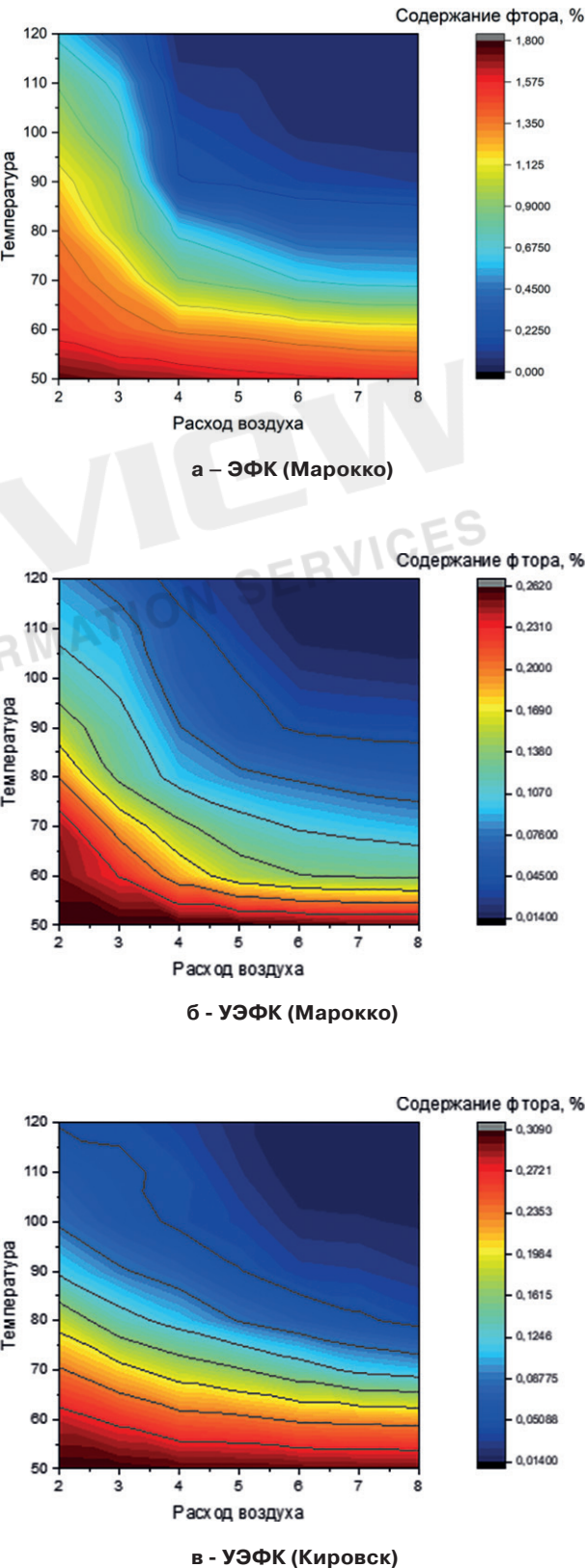


РИС. 4

РЕНТГЕНОГРАММА ОСАДКА, ВЫДЕЛЯЕМОГО ПРИ ОТДУВКЕ КИСЛОТЫ

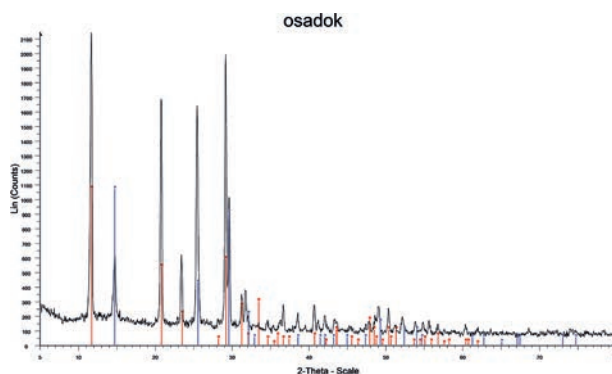


РИС. 6

РЕНТГЕНОГРАММЫ ОСАДКОВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ КИСЛОТ

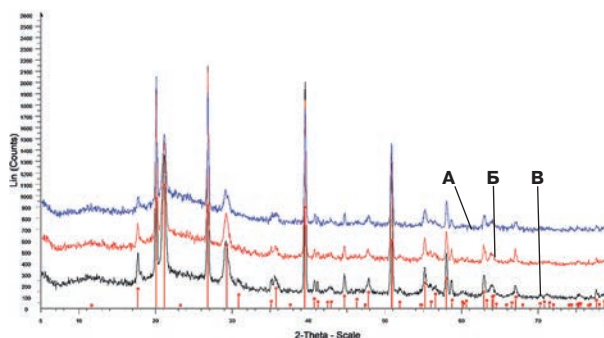
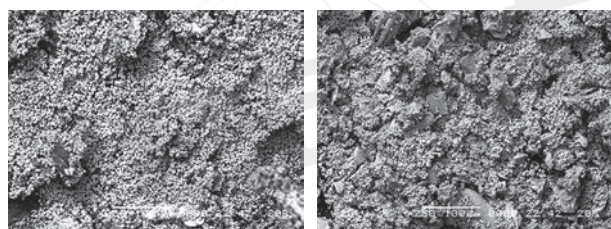


РИС. 5

МИКРОФОТОГРАФИИ ОСАДКА, ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ РОСТА КРИСТАЛЛОВ



а – 1 час

б – 48 часов

Таким образом использование комбинированного способа обесфторивания фосфорной кислоты обеспечивает достижение остаточного содержания фтора от 0,015 до 0,043 % для различных видов кислот, что обеспечивает

возможность ее последующего использования для получения большинства видов кормовых и технических фосфатов (таблица 8). В то же время полное удаление соединений фтора из ЭФК комбинированным методом невозможно ввиду медленного разрушения фторсодержащих комплексных соединений в жидкой фазе.

Анализ микрофотографий образцов осадков, полученных при очистке экстракционных фосфорных кислот методом осаждения (рис. 5), хорошо коррелируется с данными о характере изменения остаточного содержания фтора от продолжительности отстаивания (рис. 2) и выводами о существенном влиянии данного фактора на процесс обесфторивания. При продолжительности стадии отстаивания в интервале до одного часа образуется однородный мелкокристаллический осадок, с размером частиц 2–4 мкм, характерный для массовой кристаллизации. При увеличении продолжительности до 6 часов отмечается образование монокристаллов с размером частиц 10–20 мкм, составляющих примерно 5–10 % от всего объема осадка. При дальнейшем увеличении

ТАБЛИЦА 8

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ОРТОФОСФОРНОЙ КИСЛОТЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВИДА ФОСФАТНОГО СЫРЬЯ И МЕТОДОВ ОЧИСТКИ

Компоненты	Содержание, мас. %											
	ЭФК (Марокко)				УЭФК (Марокко)				УЭФК (Кировск)			
	исходная ЭФК	очистка реакгентным методом	комбинированная очистка	степень очистки от фтора, %	исходная УЭФК	очистка реакгентным методом	комбинированная очистка	степень очистки от фтора, %	исходная УЭФК	очистка реакгентным методом	комбинированная очистка	степень очистки от фтора, %
P ₂ O ₅	22,64	23,18	52,12	-	48,02	48,01	51,52	-	49,088	48,74	53,30	-
F	1,800	0,075	0,043	97,61	0,263	0,042	0,015	94,30	0,310	0,040	0,015	95,16
CaO	0,289	0,216	0,119	58,82	0,179	0,161	0,121	32,40	0,257	0,234	0,020	92,22
MgO	0,095	0,099	0,183	-	0,173	0,187	0,179	-	0,188	0,196	0,192	-
Fe ₂ O ₃	1,590	0,930	1,213	23,71	0,272	0,186	0,211	22,43	1,600	0,978	1,046	34,63
Al ₂ O ₃	1,635	0,820	0,865	47,09	0,253	0,174	0,250	1,19	0,987	0,610	0,982	0,51
K ₂ O	0,098	0,015	0,015	84,69	0,019	0,009	0,007	63,17	0,108	0,051	0,048	55,56
Na ₂ O	0,328	0,655	0,086	73,78	0,049	0,338	0,048	2,04	0,168	0,452	0,025	85,12
SO ₄	3,350	3,314	2,845	15,07	2,937	2,908	2,900	1,26	2,867	2,829	2,798	2,41

до 24 часов количество крупных монокристаллов составляет 15–20 % от всего объема осадка, их размер 20–30 мкм, а через 48 часов доля крупных монокристаллов составляет свыше 50 %, а их средний размер 35–50 мкм (рис. 5б). По данным рентгенофазового анализа (рис. 6а) основной кристаллической фазой, является гексафторсиликат натрия, что подтверждается данными химического анализа. Кроме того, в осадке идентифицируются примеси фторида кальция, алюмосиликатов калия, натрия, SiO_2 . Причем сравнение рентгенограмм осадков (рис. 6а–6в), полученных при очистке различных видов фосфорных кислот, показывает незначительные различия в фазовом составе осадков и подтверждает идентичность механизма очистки от соединений фтора методом осаждения труднорастворимых кремнефторидов щелочных металлов.

Содержание фторидов в образующихся при обесфторивании кислот осадках составляет от 29,74 до 38,64 % в виде гексафторсиликата натрия (до 65 % от массы осадка), что позволяет использовать их для производства гексафторсиликата натрия либо иных фтористых солей.

Таким образом, выполненный цикл исследований позволил установить эффективные технологические параметры ведения отдельных стадий процесса обесфторивания ЭФК, обеспечивающие возможность ее последующего использования для получения технических фосфатов.

Заключение

Одним из основных критериев при выборе метода обесфторивания ЭФК являются нормативные требования по содержанию фтора в целевых продуктах – кормовых и технических фосфатах. Как показал выполненный авторами анализ продукции отечественных и зарубежных производителей, для получения практически всех видов кормовых и технических фосфатов остаточное содержание фторид-ионов в очищенной ЭФК должно составлять не более 0,05%.

Индивидуальные способы очистки ЭФК – осаждение и отдувка хотя и являются эффективными, однако не обеспечивают требуемой степени очистки от фтор-иона. Результаты выполненного комплекса исследований показали, что комбинация указанных выше методов позволяет получить кислоту достаточно глубокой степени очистки. Остаточное содержание фтора в очищенной ЭФК колебалось от 0,015 до 0,043% в зависимости от вида исходного фосфатного сырья, что обеспечивает возможность ее последующего использования для получения большинства видов кормовых и технических фосфатов. Для сравнения остаточное содержание фтора в очищенной технической ортофосфорной кислоте российской компании ООО «Воскресенский завод фосфорных кислот» марки «Т2» составляет 0,1%, марки «Т3» – 0,05% (ТУ 2142-001-00209450-95), компании Prayon – 0,015–0,25%.

Данный синергетический эффект комбинирования отдельных методов обусловлен тем, что, оставшийся после первой стадии осаждения активный SiO_2 способствует переходу HF в SiF_4 на последующей стадии отдувки. Как известно, SiF_4 более летуч, чем HF , что и обуславливает достижение более высокой степени обесфторивания кислоты в этом случае. Определены эффективные параметры ведения отдельных технологических стадий процесса обесфторивания ЭФК: приготовления осадительной суспензии, осаждения, фильтрации и отмывки осадка, отдувки кислоты. В качестве осадительного реагента предложена композиция, на основе жидкого стекла и кальцинированной соды, количественный состав и соотношение отдельных ингредиентов в которой обеспечивают достижение максимальной степени обесфторивания ЭФК, необходимой для ее последующего использования для получения технических фосфатов. Установлено, что лимитирующей стадией реагентной очистки является стадия роста кристаллов гексафторсиликата натрия и последующего отделения образующегося осадка. Существенное влияние на свойства образующегося осадка оказывает также количество вводимой в осадительную суспензию жидкой фазы. Показано, что отличия в химическом и минералогическом составе исходных фосфатных руд для получения ЭФК предопределяют отличия параметров технологического режима отдельных стадий ее очистки.

Библиография:

1. Анализ размера и доли рынка фосфорной кислоты – тенденции роста и прогнозы (2024–2029 гг.) // Hyderabad, Telangana, 2024. <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/phosphoric-acid-market>
2. Обзор рынка фосфорной кислоты // М., 2023. <https://www.exactitudeconsultancy.com/ru.ifastat.org/market-outlooks>
3. Новости // М., 2023. https://www.rapu.ru/news/proizvodstvo_fosfornoj_kisloty_na_predpriyati/4938
4. Мировой рынок фосфорной кислоты – тенденции отрасли и прогноз до 2031 года // М., 2023. <https://www.databridgemarketresearch.com/ru/reports/global-phosphoric-acid-market>
5. Фирсов А. В., Смирнов Н. Н. Исследование комбинированного способа очистки экстракционной фосфорной кислоты дигидратного производства // Труды НИУИФ: к 100-летию основания института: в 2 т. Т. 1, Вологда: Древности Севера, 2019, С. 222–227.
6. Кочетков С. П., Смирнов Н. Н., Ильин А. П. Концентрирование и очистка экстракционной фосфорной кислоты: монография / ГОУВПО Иван. гос. хим.-технол. ун-т, Иваново, 2007, 304 с.
7. Ибрагимов Г. И., Волынская Н. В., Усманов И. И., Беглов Б. М. Получение фосфатов аммония кормовой чистоты из экстракционной фосфорной кислоты Каратау // Хим. пром-сть, 2002, № 12, С. 11–14.
8. Кочетков С. П., Тихонов С. В., Михайличенко А. И. [и др.] Теоретические основы и технология глубокой очистки ЭФК, пригодной для получения чистых фосфорных солей // Труды VIII международной конференции. Химия – XXI век: новые технологии, новые продукты, Кемерово, 2005, С. 387–389.

References.

1. Analyzing Phosphoric Acid Market size and share – growth trends and forecasts (2024–2029) // Hyderabad, Telangana, 2024. <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/phosphoric-acid-market> (in Russ.)
2. Phosphoric acid market overview // М., 2023. <https://www.exactitudeconsultancy.com/ru.ifastat.org/market-outlooks> (in Russ.)
3. News // М., 2023. https://www.rapu.ru/news/proizvodstvo_fosfornoj_kisloty_na_predpriyati/4938 (in Russ.)
4. Global Phosphoric Acid Market – Industry Trends and Forecast to 2031 // М., 2023. <https://www.databridgemarketresearch.com/ru/reports/global-phosphoric-acid-market> (in Russ.)
5. Firsov A. V., Smirnov N. N. Study of the combined method of purification of extraction phosphoric acid dihydrate production // Proceedings of NIUIF: to the 100th anniversary of the founding of the Institute: in 2 vol. V. 1, Vologda: Antiquities of the North, 2019, pp. 222–227 (in Russ.)
6. Kochetkov S. P., Smirnov N. N., Ilyin A. P. Concentration and purification of extraction phosphoric acid: monograph / GOUVPO Ivan. gos. chem.-technol. un-unit, Ivanovo, 2007, 304 p (in Russ.)
7. Ibragimov G. I., Volynskova N. V., Usmanov I. I., Beglov B. M. Obtaining ammonium phosphates of feed purity from extractive phosphoric acid Karatau // Chemical Industry, 2002, No 12, pp. 11–14 (in Russ.)
8. Kochetkov S. P., Tikhonov S. V., Mikhailichenko A. I. [et al.] Theoretical basis and technology of deep purification of EPC, suitable for obtaining pure phosphorus salts // Proceedings of the VIII International Conference. Chemistry – XXI century: new technologies, new products, Kemerovo, 2005, pp. 387–389 (in Russ.)

9. Артамонов А. В., Смирнов Н. Н., Фирсов А. В. Применение модифицированных угольных сорбентов и ионообменных смол в процессах очистки экстракционной фосфорной кислоты // Труды НИУИФ: к 100-летию основания института: в 2 т. Т. 1, Вологда: Древности Севера, 2019, С. 214–221.
10. Смирнов Н. Н., Кочетков С. П., Хромов С. В. [и др.]. Исследование адсорбционно-химического взаимодействия при очистке ЭФК наугольных адсорбентах // Химическая технология, 2004, № 1, С. 14–18.
11. Борисов В. М. Очистка ЭФК с помощью алкилбензолсульфонокислот // Хим. пром-сть, 1980, № 6, С. 348–350.
12. Борисов В. М. [и др.]. Исследование процесса обесфторивания экстракционной фосфорной кислоты методом отдувки // Хим. пром-сть, 1982, № 11, С. 23–26.
13. Меликулова Г. Э. [и др.]. Интенсификация процесса обесфторивания экстракционной фосфорной кислоты из фосфоритов Центральных Кызылкумов в присутствии соединений кислотнорастворимой окиси кремния // Universum: технические науки: электрон. научн. журн., 2024, № 1 (118), 6 с.
14. Гришин И. С., Смирнов Н. Н., Кочетков С. П. Дефторирование экстракционной фосфорной кислоты с применением механохимически модифицированного активированного угля // Экология и строительство., 2018, № 4, С. 4–10.
15. Каршиев Б. Н. [и др.]. Очистка экстракционной фосфорной кислоты из мытого обожженного фосфоконцентрата с помощью уксусной кислот // Universum: Технические науки: электрон. научн. журн 2018, № 8(53).
16. Mansouri S., Varmra K., Aghel B. Continuous Purification of Wet-Process Phosphoric Acid via Microchannel // Iran. J. Chem. Chem. Eng., 2022, Vol. 41, № 1, pp. 79–87.
17. Xing L., Jun L., JianHong L., Yang J., Da Z. Purification of Wet Process Phosphoric Acid by Solvent Extraction using Cyclohexanol // Solvent Extraction Research and Development., Japan., 2017, Vol. 24, № 1, pp. 23–35.
18. V. P. Meshalkina, b, I. A. Pochitalkina, Yu. A. Bessolova, and A. V. Artamonov. Methodology of Organization of Closed Water Circulation of Enterprises for the Production of Extraction of Phosphoric Acid and Mineral Fertilizers // Russian Journal of General Chemistry, 2022, Vol. 92, No. 12, pp. 2993–2997.)
19. ГОСТ 20851.2-75. Удобрения минеральные. Методы определения содержания фосфора. Москва: Гос. ком. СССР по стандартам: Издательство стандартов, 1983, 39 с.
20. Винник М. М. [и др.]. Методы анализа фосфатного сырья, фосфорных и комплексных удобрений, кормовых фосфатов // М.: Химия, 1975, 218 с.
21. JCPDS International Centre for Diffraction Data 2023.
22. Можейко Ф. Ф., Шульга Н. В., Шевчук В. В. Получение обесфторенной экстракционной фосфорной кислоты методом осаждения гексафторосиликатов // Весці нац. Акадэміі навук Беларусі. Сер. Хім. навук, 2008, № 1, С. 9–14.
23. Справочник по растворимости. Т. 1, Кн. 1, М. – Л.: ИАН СССР, 1961, С. 135.
24. Патент РБ № 4692, МПК С 01 В 25/225. Способ очистки упаренной экстракционной фосфорной кислоты. Воробьев Н. И., Тетеревков А. И., Кулешова С. И. [и др.], 2002.
25. Кочетков, С. П., Смирнов, Н. Н., Ильин, А. П. [и др.]. Физико-химический аспект влияния примесей и интенсивного тепломассообмена на дегазацию и дефторирование ЭФК // Хим. технология, 2005, № 10, С. 41–47.
9. Artamonov A. V., Smirnov N. N., Firsov A. V. Application of modified carbon sorbents and ion-exchange resins in the processes of purification of extraction phosphoric acid // Proceedings of NIUIF: to the 100th anniversary of the founding of the Institute: in 2 vols. V. 1, Vologda: Antiquities of the North, 2019, pp. 214–221 (in Russ.)
10. Smirnov N. N., Kochetkov S. P., Khromov S. V. [et al.] Investigation of adsorption-chemical interaction in the purification of EFC on nугоl adsorbents // Chemical Technology, 2004, No. 1, pp. 14–18 (in Russ.)
11. Borisov V. M. Purification of EFC with the help of alkylbenzenesulfonic acids // Chemical Industry, 1980, No. 6, pp. 348–350 (in Russ.)
12. Borisov V. M. [et al.] Investigation of the process of decofluorination of extraction phosphoric acid by blowing method // Chemical Industry, 1982, No. 11, pp. 23–26 (in Russ.)
13. Melikulova G. E. [et al.] Intensification of the process of decofluorination of extractive phosphoric acid from phosphorites of Central Kyzylkum in the presence of acid-soluble silicon oxide compounds // Universum: technical sciences: electronic scientific journal, 2024, No. 1 (118), 6 p (in Russ.)
14. Grishin I. S., Smirnov N. N., Kochetkov S. P. Defluoridation of extraction phosphoric acid using mechanochemically modified activated carbon // Ecology and Construction., 2018, No. 4, pp. 4–10 (in Russ.)
15. Karshiev B. N. [and others]. Purification of extraction phosphoric acid from washed calcined phosphorus concentrate using acetic acids // Universum: Technical Sciences: electron. scientific journal 2018, No. 8(53).
16. Mansouri S., Varmra K., Aghel B. Continuous Purification of Wet-Process Phosphoric Acid via Microchannel // Iran. J. Chem. Chem. Eng., 2022, Vol. 41, № 1, pp. 79–87.
17. Xing L., Jun L., JianHong L., Yang J., Da Z. Purification of Wet Process Phosphoric Acid by Solvent Extraction using Cyclohexanol // Solvent Extraction Research and Development., Japan., 2017, Vol. 24, № 1, pp. 23–35.
18. V. P. Meshalkina, b, I. A. Pochitalkina, Yu. A. Bessolova, and A. V. Artamonov. Methodology of Organization of Closed Water Circulation of Enterprises for the Production of Extraction of Phosphoric Acid and Mineral Fertilizers // Russian Journal of General Chemistry, 2022, Vol. 92, No. 12, pp. 2993–2997
19. GOST 20851.2-75. Mineral fertilizers. Methods of determination of phosphorus content. Moscow: Gos. com. USSR standards: Standards Publishing House, 1983, 39 p (in Russ.)
20. Vinnik M. M. [et al.] Methods of analysis of phosphate raw materials, phosphate and complex fertilizers, fodder phosphates // M.: Khimiya, 1975, 218 p (in Russ.)
21. JCPDS International Center for Diffraction Data 2023.
22. Mozheiko F. F., Shulga N. V., Shevchuk V. V. Obtaining of defluorinated extraction phosphoric acid by hexafluorosilicate precipitation method // Vesti nats. akademii nauk Belarusi. Ser. Khim. nauk, 2008, No. 1, pp. 9–14 (in Russ.)
23. Handbook on solubility. T. 1, Book 1, M. – L.: IAS USSR, 1961, 135 p. (in Russ.).
24. Patent RB No. 4692, MPK C 01 B 25/225. Method of purification of evaporated extraction phosphoric acid. Vorobiev N. I., Teterevov A. I., Kuleshova S. I. [et al.], 2002 (in Russ.)
25. Kochetkov, S. P., Smirnov, N. N., Ilyin, A. P. [et al.]. Physico-chemical aspect of the influence of impurities and intensive heat and mass transfer on dehydration and defluorination of EFC // Chem. tekhnologiya, 2005, No. 10, pp. 41–47 (in Russ.)

Краткая информация об авторах:

Дормешкин Олег Борисович*

Белорусский государственный технологический университет, директор международного информационно-аналитического центра трансфера технологий, доктор технических наук, профессор.

Адрес: 220006, Республика Беларусь, г. Минск ул. Свердлова 13-а.

E-mail: Dormeshkin@yandex.ru

Гаврилюк Андрей Николаевич

Белорусский государственный технологический университет, проректор по учебной работе, заведующий кафедрой технологии неорганических веществ и общей химической технологии, кандидат технических наук, доцент.

Адрес: 220006, Республика Беларусь, г. Минск ул. Свердлова 13-а.

E-mail: Gavriluk_andrew@mail.ru

Мохорт Марк Сергеевич

Белорусский государственный технологический университет, аспирант кафедры технологии неорганических веществ и общей химической технологии.

Адрес: 220006, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Свердлова 13-а.

E-mail: markmohort@gmail.com

Бышик Александр Александрович

Белорусский государственный технологический университет, магистрант кафедры технологии неорганических веществ и общей химической технологии.

Адрес: 220006, Республика Беларусь, г. Минск ул. Свердлова 13-а.

E-mail: fxguru29@gmail.com

Authors

Oleg Borisovich Dormeshkin*

Belarusian State Technological University, Director of the International Information and Analytical Center for Technology Transfer, Doctor of Technical Sciences (D. Sc. (Engineering)), Professor.

Address: 13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus/

E-mail: Dormeshkin@yandex.ru

Andrei Nikolaevich Hauryliuk

Belarusian State Technological University, Vice-Rector for Academic Affairs, Candidate of Technical Sciences, (PhD (Engineering)), Associate Professor.

Address: 13-a Sverdlova str., Minsk, 220006, Republic of Belarus.

E-mail: Gavriluk_andrew@mail.ru

Mark Sergeevich Mohart

Belarusian State Technological University, postgraduate student of the Department of Technology of Inorganic Substances and General Chemical Technology.

Address: 13-a Sverdlova str., Minsk, 220006, Republic of Belarus.

E-mail: markmohort@gmail.com

Alexander Alexandrovich Byshyk

Belarusian State Technological University, Master's student of the Department of Technology of Inorganic Substances and General Chemical Technology.

Address: 13-a Sverdlova str., Minsk, 220006, Republic of Belarus/

E-mail: fxguru29@gmail.com