

ТЭХНІЧНАЯ ХІМІЯ І ХІМІЧНАЯ ТЭХНАЛОГІЯ
TECHNICAL CHEMISTRY AND CHEMICAL ENGINEERINGУДК 661.85
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2024-60-2-153-161>Поступила в редакцию 12.07.2023
Received 12.07.2023**О. Б. Дормешкин, А. Н. Гаврилюк, М. С. Мохорт, А. А. Бышик***Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь***ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КИСЛОТНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ
И ПОЛУЧЕНИЯ ЭКСТРАКЦИОННОЙ ФОСФОРНОЙ КИСЛОТЫ
НА ОСНОВЕ МАРОККАНСКИХ ФОСФОРИТОВ**

Аннотация. Представлены результаты исследований по установлению физико-химических особенностей кислотной переработки североафриканских (марокканских) фосфоритов, а также их влияния на технологический процесс получения экстракционной фосфатной кислоты (ЭФК). Установлены значительные различия в характере протекания и количественных показателях процесса кислотного разложения, сингонии и размеров образующихся кристаллов сульфата кальция для различных марок фосфоритов, что обусловлено существенным влиянием на процесс разложения не только технологического режима проведения процесса, но и в значительной степени различиями в минералогическом составе фосфатных руд. Повышенное содержание в фосфоритах марки К-9 и К-10 карбонатапатитов обусловило более высокую реакционную способность в области низких концентраций серной кислоты. В то же время высокая реакционная способность карбонатапатитов приводит к ряду негативных процессов, в частности обильному пенообразованию и пассивации зерен фосфатного сырья мелкокристаллическим осадком сульфата кальция, образующимся за счет быстрого пересыщения системы, что, в свою очередь, приводит к резкому снижению степени разложения. Установлено значительное отличие характера кристаллизации сульфата кальция для условий получения ЭФК от известных данных, что позволило сделать вывод о том, что скорость и характер процесса перекристаллизации сульфата кальция в системе $\text{CaO-P}_2\text{O}_5\text{-H}_2\text{O}$ определяются не только температурой, сульфатным режимом и содержанием P_2O_5 в жидкой фазе, но также природой и составом фосфатного сырья. На основании экспериментальных данных сделаны выводы о снижении мощности производства ЭФК при переходе с апатитов на североафриканские фосфориты от 21,89 до 24,23 % (в зависимости от марки марокканского фосфорита), увеличении нагрузки на фильтры и уменьшении количества выделяющихся в газовую фазу соединений фтора.

Ключевые слова: фосфатное сырье, кислотная переработка, минералогический состав, серная кислота, кинетика, экстракционная фосфорная кислота, фтор, фосфогипс, оптимальные условия, технико-экономические показатели

Для цитирования. Физико-химические особенности кислотного разложения и получения экстракционной фосфорной кислоты на основе марокканских фосфоритов / О. Б. Дормешкин [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хим. наук. – 2024. – Т. 60, № 2. – С. 153–161. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2024-60-2-153-161>

O. B. Dormeshkin, A. N. Hauryliuk, M. S. Mokhart, A. A. Byshyk*Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus***PHYSICO-CHEMICAL FEATURES OF ACID DECOMPOSITION AND PRODUCTION
OF EXTRACTION PHOSPHORIC ACID BASED ON MOROCCAN PHOSPHORITES**

Abstract. The results of research on the establishment of physicochemical features of acid processing of North African (Moroccan) phosphorites, as well as their influence on the technological process and technical and economic indicators of extraction phosphate acid (EPA) production are presented. Significant differences have been established in the nature of the acid decomposition process, syngony and the size of the formed calcium sulfate crystals for different grades of phosphorites, which is due to a significant influence on the decomposition process not only of the technological mode of the process, but to a large extent differences in the mineralogical composition of phosphate ores. Thus, the increased content of carbonate apatites in phosphorites of the K-9 and K-10 grades led to a higher reactivity in the region of low concentrations. At the same time, the high reactivity of carbonateapatites leads to a number of negative processes, in particular, abundant foaming and passivation of grains of phosphate raw materials with fine-crystalline calcium sulfate precipitate, formed due to the rapid supersaturation of the system, which in turn leads to a sharp decrease in the degree of decomposition. A significant difference

in the nature of calcium sulfate crystallization for the conditions for obtaining EPA from the known data was established, which made it possible to conclude that the rate and nature of the process of calcium sulfate recrystallization in the $\text{CaO-P}_2\text{O}_5\text{-H}_2\text{O}$ system is determined not only by temperature, sulfate regime and P_2O_5 content in the liquid phase, but also by the nature and composition of phosphate raw materials. Based on experimental data, conclusions were drawn about a decrease in power during the transition from apatite to phosphorites from 21.89 to 24.23% (depending on the brand of Moroccan phosphorite), a significant increase in the load on filters and a decrease of 1.5–2 times in the amount of fluorine compounds released into the gas phase during decomposition.

Keywords: phosphate raw materials, acid processing, sulphuric and phosphoric acid, mineralogical composition, fluorine, optimal conditions, phosphogypsum, technical and economic indicators

For citation. Dormeshkin O. B., Hauryliuk A. N., Mokhart M. S., Byshyk A. A. Physico-chemical features of acid decomposition and production of extraction phosphoric acid based on moroccan phosphorites. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2024, vol. 60, no. 2, pp. 153–161 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2024-60-2-153-161>

Введение. Одной из наиболее актуальных задач предприятий по производству минеральных удобрений Республики Беларусь и других стран, производящих фосфорсодержащие удобрения, но не имеющих собственной сырьевой базы, на современном этапе является расширение фосфатно-сырьевой базы и вовлечение в переработку фосфатов новых месторождений.

Однако, как показал опыт, переход на иные источники сырья не является чисто технической процедурой, а связан с необходимостью существенного изменения технологического режима, в отдельных случаях технологического процесса в целом, а также существенно влияет на ключевые технико-экономические показатели. Среди наиболее перспективных видов фосфатного сырья с учетом транспортной логистики и конъюнктуры цен являются североафриканские фосфориты, в частности фосфориты Марокко.

Исследования минералогического и фазового состава североафриканских фосфоритов из Марокко, выполненные ранее [1], показали, что, несмотря на близость их химического состава, имеются значимые различия в содержании и соотношении отдельных фаз, позволяющие предположить наличие возможных особенностей в характере протекания процесса кислотного разложения в производстве ЭФК и удобрений. В частности, установлено увеличение удельной доли фосфора, присутствующего в форме карбонатапатита для марки К-10. Так, если для марки К-20 соотношение карбонатапатита к фторапатиту составляет 1,3, то для марки К-10 это соотношение возрастает до 2,28. Существенные различия в реакционной способности и характере протекания процесса разложения фторапатитов и карбонатапатитов позволяют предположить, что в процессе разложения исследуемых марок фосфоритов существуют отличия. Кроме того, отмечено повышенное содержание силикатов кальция в марке К-20, которые, как установлено ранее [2], препятствуют росту кристаллов сульфата кальция и способствуют уменьшению их размера за счет образования гелеобразных кремниевых кислот, обволакивающих кристаллы сульфата кальция.

Авторами выполнен комплекс исследований, целью которых явилось установление физико-химических особенностей серно- и фосфорнокислотной переработки североафриканских (марокканских) фосфоритов с учетом различий в их фазовом и минералогическом составех, влияния новых видов фосфатного сырья на технологический процесс и количественные показатели получения ЭФК.

Методика эксперимента и методы исследования. Объектами исследования являлись образцы марокканских фосфоритов различных марок, поставляемые в настоящее время на отечественные предприятия, химический состав которых приведен в табл. 1.

При проведении исследований использовались следующие технические продукты и полупродукты промышленного производства, химические реактивы: серная кислота техническая производства Гомельского химического завода (ГХЗ), первого сорта (ГОСТ 2184-77) с массовой долей H_2SO_4 93,7 %; упаренная экстракционная фосфорная кислота (УЭФК) производства ГХЗ с массовой долей P_2O_5 48,02 %.

Исследование процесса кислотного разложения североафриканских фосфоритов различных марок и получения ЭФК проводили в термостатируемом химическом реакторе фирмы Lenz (Германия) с перемешивающим устройством. Рентгенографическое исследование проводили с использованием рентгеновского дифрактометра D8 Advance фирмы Bruker (США).

Таблица 1. Химический состав фосфоритов из Марокко различных марок

Table 1. Chemical composition of phosphorites from Morocco of various grades

Компоненты	Содержание в зависимости от марки, мас.%		
	К-9	К-10	К-20
P ₂ O ₅ общ.	31,23	31,64	32,42
P ₂ O ₅ вод.	0,62	0,41	0,52
P ₂ O ₅ усв.	13,64	12,98	12,10
CaO	49,17	50,19	51,43
MgO	0,59	0,62	0,73
Al ₂ O ₃	1,95	2,35	2,38
Fe ₂ O ₃	0,28	0,42	0,40
Na ₂ O	0,48	0,60	0,62
K ₂ O	0,11	0,10	0,10
CO ₂	3,86	3,75	3,80
SO ₃	0,95	0,72	1,19
F	3,73	3,37	3,42
Cl	0,0057	0,0061	0,0059
H ₂ O	1,76	1,63	1,36
SiO ₂	4,16	3,96	3,42
н. о. в HCl	3,07	2,64	2,10
Cd	0,00123 (или 12,3 ppm)	0,0016 (или 16,0 ppm)	0,00115 (или 11,5 ppm)
Pb	0,00042 (или 4,2 ppm)	0,000424 (или 4,24 ppm)	0,000413 (или 4,13 ppm)
As	0,00183 (или 18,3 ppm)	0,002084 (или 20,84 ppm)	0,00169 (или 16,9 ppm)
Hg	< 0,000125 (или 1,25 ppm)	< 0,000125 (или 1,25 ppm)	< 0,000125 (или 1,25 ppm)

Результаты и их обсуждение. На первом этапе исследований изучен процесс кислотного разложения фосфатного сырья различных марок с учетом особенностей их минералогического состава.

Характер зависимости коэффициента разложения исследуемых марок фосфоритов от содержания серной кислоты в жидкой фазе подтверждает сделанное выше предположение (рис. 1). Так, если для образцов К-9 и К-10 характерны два экстремума в интервале 20–25 и 50–53 %, что близко к характеру протекания процесса сернокислотного разложения для иных видов фосфатного сырья, в частности сирийских фосфоритов и фосфоритов Каратау [3], то для образца К-20 свойственно наличие только одного максимума в интервале 40–45 %, тогда как для иных образцов в этом интервале наблюдается минимум. Необходимо отметить, что вид изохроны зависимости коэффициента разложения от концентрации кислоты для образца К-20 близок к аналогичной кривой, характерной для другой группы фосфатного сырья – ковдорского апатита [3, 4]. Существенным отличием, определяющим характер зависимости степени разложения от концентрации кислоты и показатели стадии разложения фосфоритов от апатитов, является присутствие основного количества фосфора в составе более легкоразлагаемых минералов – карбонатапатитов и гидроксилатапатитов. Присутствие значительной части фосфора в образцах К-9 и К-10 в составе карбонатапатитов является одной из основных причин наличия существенных различий в характере кривых (см. рис. 1). Более высокая реакционная способность карбонатапатитов в области концентраций 20–25 % обуславливает наличие максимума в этом интервале. Поскольку разложение данного вида минералов сопровождается значительным пенообразованием за счет выделения в газовую фазу диоксида углерода, то имеющее место обильное пенообразование для образца К-10 является косвенным подтверждением более высокой интенсивности процесса кислотного разложения карбонатапатитов в этом интервале.

тых вдоль вертикальной единичной оси, размером до 100 мкм с небольшим количеством полугидрата ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$). Повышенное содержание силикатов кальция и магния в образце К-20 экранирует рост кристаллов сульфата кальция в этом интервале (см. рис. 3), а низкая реакционная способность апатитов в области низкой концентрации серной кислоты обуславливает низкую степень разложения.

По мере роста концентрации серной кислоты возрастает общая степень разложения для образца К-20 и достигает максимума в интервале 40–45 %. Как показали данные рентгенофазового анализа, основной твердой фазой в этом интервале является преимущественно полугидрат ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$). Причем для образца К-20 отмечается возрастание среднего размера кристаллов, тогда как для К-10 наблюдается их значительное снижение. Кроме того, для образцов К-9 и К-10 в этом интервале на микрофотографиях идентифицируются отдельные зерна фосфатного сырья, пассивированные мелкими кристаллами сульфата кальция (см. рис. 3). Образующийся плотный слой на зернах неразложившегося сырья существенно затрудняет диффузионные процессы и является основной причиной минимума на кривых разложения для образцов К-9 и К-10.

Известно, что при разложении фосфатного сырья серной кислотой возможно получение только низкоконцентрированных удобрений типа простого суперфосфата [7, 8]. В производстве ЭФК, а также для увеличения содержания макроэлементов в фосфорсодержащих удобрениях (аммофосфат, двойной и аммонизированный суперфосфат и др.) на стадии разложения дополнительно вводится фосфорная кислота.

В связи с этим задачей последующего этапа исследований явилось изучение особенностей совместного серно- и фосфорнокислотного разложения марокканских фосфоритов. Как показали ранее выполненные авторами исследования, при разложении фосфатного сырья только фосфорной кислотой коэффициент разложения не превышает 50–55 %, поэтому оптимальным вариантом является разложение смесью серной и фосфорной кислот. Однако уже при введении небольшого количества фосфорной кислоты на стадии разложения происходит уменьшение коэффициента разложения, падение которого продолжается с увеличением доли фосфорной кислоты. Данная тенденция характерна для всех применяемых источников сырья. На основании проведенных исследований авторами сделан вывод о том, что процесс разложения необходимо осуществлять в две стадии: разложение серной кислотой с последующим вводом фосфорной кислоты в фосфорнокислую суспензию и разложение фосфорной кислотой с постоянным дозированием серной кислоты для поддержания необходимого сульфатного режима. Исследования кислотного разложения североафриканских фосфоритов различных марок проводили при норме расхода серной кислоты, составляющей 100 % от стехиометрии с учетом содержания CaO , MgO и полугидратных оксидов. Концентрация вводимой в качестве раствора разбавления фосфорной кислоты по P_2O_5 в зависимости от вида фосфатного сырья и условий разложения варьировалась в диапазоне 14,88–18,3 мас.%. Температура разложения изменялась в интервале 84–96 °С. Выбор температурного интервала соответствовал фактическому температурному интервалу дигидратного и полугидратного режимов получения фосфорной кислоты, реализуемых на профильных предприятиях Беларуси, России и стран СНГ [5]. Навеску фосфата порционно добавляли к жидкой фазе в течение 5 мин. Продолжительность процесса варьировалась в интервале 60–240 мин. Для поддержания оптимального сульфатного режима часть серной кислоты (в количестве 10 %) вводили в реакционную суспензию через 60 мин после начала процесса.



Рис. 3. Микрофотография образцов осадков, полученных при сернокислотном разложении фосфорита марки К-10 (увеличение $\times 1\,000$, концентрация кислоты 45 %)

Fig. 3. Micrograph of sediment samples obtained by sulfuric acid decomposition of K-10 phosphorite (increase $\times 1\,000$, acid concentration 45 %)

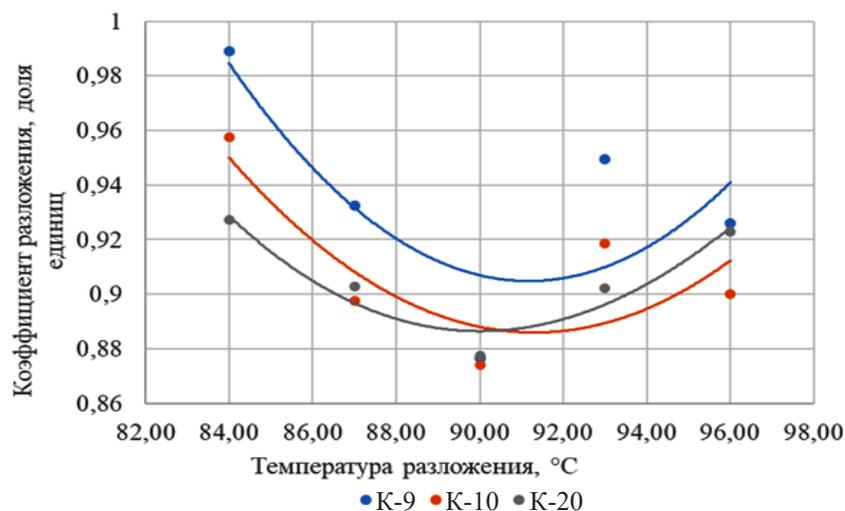


Рис. 4. Влияние температуры процесса на коэффициент кислотного разложения фосфатов

Fig. 4. Effect of process temperature on the acid decomposition coefficient of phosphates

Результаты исследований показали, что кривые зависимости коэффициента разложения фосфатного сырья от температуры характеризуются наличием экстремума (минимума) в интервале температур 88–92 °С. (рис. 4).

Поскольку, как отмечалось выше, важнейшим фактором, определяющим характер и показатели процесса кислотного разложения фосфатного сырья, является кристаллизация сульфата кальция из жидкой фазы в одной из его кристаллогидратных модификаций, то для объяснения полученных зависимостей были проанализированы данные рентгенофазового анализа, электронной микроскопии, а также гистограммы распределения размера частиц осадка для различных видов сырья и температур.

При кислотном разложении североафриканских фосфоритов марок К-9 и К-10 при 84 °С основной фазой является полугидрат сульфата кальция $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$, который осаждается в виде отдельных призматических монокристаллов размером до 100 мкм. Причем состав осадка достаточно однороден как по форме, так и размерам кристаллов. Можно предположить, что образующиеся в этих условиях фосфорнокислые суспензии будут характеризоваться хорошими реологическими и химико-технологическими свойствами. С увеличением температуры на рентгенограммах отмечается появление дополнительной фазы, отвечающей дигидрату сульфата кальция (гипсу), причем доля гипса по мере увеличения температуры растет и при 96 °С является преобладающей. При кислотном разложении образца марки К-20 при 84 °С сульфат кальция кристаллизуется в виде гипса и по мере дальнейшего возрастания температуры наблюдается его перекристаллизация с образованием полугидрата сульфата кальция, который является основной фазой при 96 °С.

Отработку оптимальных технологических параметров процесса кислотного разложения североафриканских фосфоритов различных марок проводили при норме расхода серной кислоты, составляющей 100 % от стехиометрии. Концентрация раствора разбавления по P_2O_5 в зависимости от вида фосфатного сырья составляла, мас. %: 18,03 – для марки К-9, 18,12 – для К-10 и 17,55 – для К-20. Оптимальная температура разложения согласно результатам исследований, представленным выше, составляла 84 °С, а продолжительность процесса – 480 мин.

Как видно из представленных в табл. 2 результатов химического анализа полученной кислоты и рассчитанных показателей, проведение процесса кислотного разложения фосфатного сырья в указанных выше оптимальных условиях обеспечивает достижение высокой степени разложения для всех видов сырья. Причем значения коэффициентов разложения, рассчитанные по анализу проб фильтратов (K_1) и осадков (K_2), отличаются на 0,1–0,5 %, что позволяет сделать вывод о достоверности полученных результатов.

Таблица 2. Результаты исследования кислотного разложения фосфатного сырья при оптимальных параметрах процесса

Table 2. Results of the acid decomposition of phosphate raw materials at optimal parameters

Коэффициент разложения сырья			Показатели качества ЭФК, мас.%							
K ₁	K ₂	K _{ср}	P ₂ O ₅	F	SO ₃	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
Марокканский фосфорит марки К-9										
0,9653	0,9655	0,9654	24,88	0,969	6,91	0,205	0,146	0,129	0,015	0,086
Марокканский фосфорит марки К-10										
0,9686	0,9688	0,9687	24,13	0,775	7,85	0,193	0,135	0,116	0,017	0,088
Марокканский фосфорит марки К-20										
0,9717	0,9730	0,9724	24,03	0,984	7,23	0,176	0,122	0,129	0,015	0,083

Для определения норм расхода сырья и мощности производства в зависимости от вида фосфатного сырья были выполнены расчеты технологических балансов согласно имеющейся методике [9]. Сводные данные по основным количественным показателям производства ЭФК и изменению мощности производства при переходе на новые виды фосфатного сырья приведены в табл. 3 и 4.

Таблица 3. Количественные показатели производства ЭФК при переходе на альтернативные виды фосфатного сырья (в расчете на 1 000 кг фосфатного сырья в натуре)

Table 3. Quantitative indicators of EPA production on the base of alternative types of phosphate raw materials (per 1 000 kg of phosphate raw materials)

Вид сырья	Концентрация производной кислоты (по P ₂ O ₅), мас.%	Масса производной кислоты (на 100 % P ₂ O ₅), кг	Масса CO ₂ , выделяющегося на стадии разложения, кг	Масса фтора, выделяющегося в газовую фазу (сумма HF + SiF ₄), кг	Масса суспензии на фильтрацию, кг	Масса суспензии на циркуляцию в экстрактор, кг
Апатит Кировский	27,00	351,02	9,80	32,45	6 790,72	54 325,75
Фосфориты Марокко марки К-9	24,88	267,76	37,26	24,34	6 788,57	54 308,53
Фосфориты Марокко марки К-10	24,13	265,98	36,33	18,31	6 890,88	55 290,19
Фосфориты Марокко марки К-20	24,03	274,17	36,94	18,87	6 991,18	55 929,45

Таблица 4. Изменение мощности производства ЭФК при переходе на альтернативные виды фосфатного сырья

Table 4. Changes of production capacity when switching to different types of phosphate raw materials

Вид сырья	Расход сырья (100 % P ₂ O ₅) на 1 т производной кислоты (100 % P ₂ O ₅), т/т	Снижение мощности по производной кислоте, %	Производительность цеха ЦФК (при одинаковом расходе фосфатного сырья) в пересчете на P ₂ O ₅ , т/год
Апатит Кировский	1,115	100	110 000
Фосфориты Марокко марки К-9	1,166	(-23,72)	83 909
Фосфориты Марокко марки К-10	1,190	(-24,23)	83 351
Фосфориты Марокко марки К-20	1,182	(-21,89)	85 917

Заключение. Результаты исследования особенностей кислотного разложения североафриканских (марокканских) фосфоритов, полученные при выполнении работы в рамках ГПНИ «Химические процессы, реагенты и технологии, биорегуляторы и биооргхимия», позволили установить значительные различия в характере протекания и количественных показателях процесса кислотного разложения, сингонии и размеров образующихся кристаллов сульфата кальция

и позволили сделать вывод о существенном влиянии на процесс разложения минералогического состава фосфатных руд. Так, повышенное содержание в фосфоритах марки К-9 и К-10 карбонат-апатитов обусловило более высокую реакционную способность в области низких концентраций. В то же время высокая реакционная способность карбонатапатитов приводит к ряду негативных процессов, в частности обильному пенообразованию и пассивации зерен фосфатного сырья мелкокристаллическим осадком сульфата кальция, образующимся за счет быстрого пересыщения системы, что, в свою очередь, приводит к резкому снижению степени разложения.

Установлено значительное отличие характера кристаллизации сульфата кальция для условий получения ЭФК от известных данных [4, 5], что позволяет сделать вывод о том, что скорость и характер процесса перекристаллизации сульфата кальция в системе $\text{CaO-P}_2\text{O}_5\text{-H}_2\text{O}$ определяются не только температурой, сульфатным режимом и содержанием P_2O_5 в жидкой фазе, но и природой и минералогическим составом фосфатного сырья.

На основании экспериментальных данных по получению ЭФК при использовании различных видов сырья и расчетов технологических балансов сделаны следующие выводы:

расчетное снижение мощности по продукционной кислоте составило от 21,89 до 24,23 % (в зависимости от марки марокканского фосфорита), что, в свою очередь, приводит к снижению количества получаемой ЭФК до 27 тыс. т P_2O_5 в расчете на одну типовую технологическую нитку при одинаковом количестве перерабатываемого фосфатного сырья;

переход на марокканские фосфориты приводит к возрастанию количества пульпы, направляемой на стадию фильтрации (до 200 кг пульпы на тонну фосфатного сырья) и увеличению нагрузки на фильтры (увеличение количества оборотной суспензии, рециркулируемой в экстрактор для обеспечения оптимального соотношения Т : Ж, потребует увеличения номинального объема экстрактора либо приведет к дополнительному снижению мощности по целевому продукту);

уменьшение количества выделяющихся в газовую фазу при разложении соединений фтора приводит к снижению съема фтора и, как следствие, уменьшению количества получаемых в виде товарной продукции фторосолей (недостаток фтора приводит к дебалансу соотношения F/SiO_2 в экстракционной пульпе);

снижение концентрации продукционной кислоты с 27 до 23–25 % приводит к возрастанию энергозатрат при последующей переработке продукционной кислоты в производстве комплексных удобрений на основе фосфатов аммония.

Список использованных источников

1. Гаврилюк, А. Н. Исследование особенностей сернокислотного разложения различных марок марокканских фосфоритов / А. Н. Гаврилюк, О. Б. Дормешкин, И. А. Русак // Тр. БГТУ. Сер. 2. Хим. технология неорганич. веществ. – 2022. – № 2. – С. 115–126.
2. Физико-химические особенности кислотного разложения сирийских фосфоритов и фосфоритов Каратау / О. Б. Дормешкин [и др.] // Тр. БГТУ. Сер. 3. Хим. технология неорганич. веществ. – 2009. – № 3. – С. 98–102.
3. Кононов, А. В. Основы технологии комплексных удобрений / А. В. Кононов, В. Н. Стерлин, Л. И. Евдокимова. – М.: Химия, 1988. – 320 с.
4. Технология фосфорных и комплексных удобрений / под ред. С. Д. Эвенчика, А. А. Бродского. – М.: Химия 1997. – 174 с.
5. Копылев, Б. А. Технология экстракционной фосфорной кислоты / Б. А. Копылев. – Л.: Химия, 1981. – 224 с.
6. Дормешкин, О. Б. Влияние видов фосфатного сырья на технологический процесс производства экстракционной фосфорной кислоты и комплексных удобрений / О. Б. Дормешкин, А. Н. Гаврилюк, Г. Х. Черчес // Тр. БГТУ. Химия и технология неорганич. веществ. – 2013. – № 3. – С. 71–77.
7. Непряхин, А. Е. Фосфатно-сырьевая база России: новые технологии и перспективы освоения / А. Е. Непряхин, П. П. Сенаторов, М. И. Карпова // Горная техника. Дробильно-размольное, сортировочное и обогатительное оборудование. – 2009. – № 4. – С. 136–144.
8. Пагалешкин, Д. А. Пути реализации принципов наилучших доступных технологий применительно к производству сложных сульфатсодержащих NPK/NPKS-удобрений / Д. А. Пагалешкин // Тр. НИУИФ: к 100-летию основания ин-та: в 2 т. – Вологда: Древности севера, 2019. – Т. 2. – С. 277–284.
9. Дыбина, П. В. Расчеты по технологии неорганических веществ / П. В. Дыбина, А. С. Соловьева, Ю. И. Вишняк. – М.: Высшая школа, 1967. – 524 с.

References

1. Hauryliuk A. N., Dormeshkin O. B., Rusak I. A. Study of the characteristics of sulfuric acid decomposition of various grades of Moroccan phosphorites. *Trudy BGTU. Seriya 2: Khimicheskie tekhnologii, biotekhnologiya, geokologiya = Proceedings of BSTU, series 2, Chemistry, Chemical technology of inorganic substances*, 2022, no. 2, pp. 115–126 (in Russian).
2. Dormeshkin O. B., Vorob'ev N. I., Cherches G. H., Hauryliuk A. N. Physicochemical features of acid decomposition of Syrian phosphorites and Karatau phosphorites. *Trudy BGTU. Khimiya i tekhnologiya neorganicheskikh veshchestv = Proceedings of BSTU, series 3, Chemistry, Chemical technology of inorganic substances*, 2009, iss. 3, pp. 98–102 (in Russian).
3. Kononov A. V., Sterlin V. N., Evdokimova L. I. *Fundamentals of complex fertilizer technology*. Moscow, Khimiya = Chemistry Publ., 1988. 320 p. (in Russian).
4. Evenchik S. D., Andreev M. V., Brodskiy A. A., Zabeleshinskiy U. A. *Technology of phosphate and complex fertilizers*. Moscow, Khimiya = Chemistry Publ., 1987. 464 p. (in Russian).
5. Kopylev B. A. *Technology of extraction phosphoric acid*. Leningrad, Khimiya = Chemistry Publ., 1981. 224 p. (in Russian).
6. Dormeshkin O. B., Hauryliuk A. N., Cherches G. H. Influence of types of phosphate raw materials on the technological process of production of extractive phosphoric acid and complex fertilizers. *Trudy BGTU. Khimiya i tekhnologiya neorganicheskikh veshchestv = Proceedings of BSTU, Chemistry, Chemical technology of inorganic substances*, 2013, iss. 3, pp. 71–77 (in Russian).
7. Nepryakhin, A. E., Senatorov P. P., Karpova M. I. Phosphate resource base of Russia: new technologies and development prospects. *Gornaya tekhnika. Drobil'no-razmol'noye, sortirovochnoye i obogatitel'noye oborudovaniye = Mining technology. Crushing and grinding, sorting and processing equipment*, 2009, no. 4, pp. 136–144 (in Russian).
8. Pagaleshkin D. A. Ways to implement the principles of best available technologies for the production of complex sulfate-containing NPK/NPKS fertilizers. *Trudy NIUIF. 1919–2019: k 100-letiyu osnovaniya instituta. T. 2 = Proceedings of the NIUIF: to the 100th anniversary of the Institute's Foundation*. Vologda, 2019, vol. 2, pp. 277–284 (in Russian).
9. Dybina P. V., Solovyova A. S., Vishnyak Y. I. *Calculations on the Technology of Inorganic Substances*. Moscow, Vysshaya shkola = High School Publ., 1967. 524 p. (in Russian).

Информация об авторах

Дормешкин Олег Борисович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: dormeshkin@yandex.ru

Гаврилюк Андрей Николаевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: gavrilyuk_andrew@mail.ru

Мохорт Марк Сергеевич – аспирант. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: markmohort@gmail.com

Бышик Александр Александрович – инженер. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: fxguru29@gmail.com

Information about the authors

Dormeshkin Oleg B. – D. Sc. (Engineering), Professor, Professor of the Department. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dormeshkin@yandex.ru

Hauryliuk Andrei N. – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gavrilyuk_andrew@mail.ru

Mokhart Mark S. – Postgraduate Student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: markmohort@gmail.com

Byshyk Alexander A. – Engineer. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: fxguru29@gmail.com