

ОБЗОР АКТУАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА ЭКСТРАКЦИОННОЙ ФОСФОРНОЙ КИСЛОТЫ

Приводится обзор некоторых наиболее распространённых и актуальных в настоящее время технологических схем процесса производства экстракционной фосфорной кислоты. Описан химизм процесса при различных условиях его проведения, выбор которых обусловлен применением различных горных пород, а также форм утилизации гипса. Приведены принципиальные технологические схемы процессов с описанием их достоинств и недостатков. Для наглядности приводится сравнительная таблица параметров описанных технологических процессов. В заключении даны некоторые практические советы по возможной реконструкции и усовершенствованию существующих производств экстракционной фосфорной кислоты.

Ключевые слова: экстракционная фосфорная кислота, фосфориты, апатиты, фильтрация, кристаллизация, дигидратный процесс, полугидратный процесс, ангидритный процесс.

The article provides an overview of the most common and relevant in the present technological schemes of the process of production of wet-process phosphoric acid. Described the chemistry of the process under various conditions of its realization, the choice of which is determined by the use of different rocks and gypsum disposal. There are principle process diagrams with descriptions of their advantages and disadvantages. For clarity, you can find the comparative table of parameters for the described processes. In addition, there are some practical tips on possible reconstruction and improvement of existing production wet-process phosphoric acid at the end of this article.

Keywords: phosphoric acid, phosphorites, apatites, filtration, crystallization, dihydrate process, hemihydrate process, unhydrate process.

Estraksion fosfor kislotasini ishlab chiqarish jarayonning texnologik sxemasini hozirgi kundagi aktual va keng tarqalgan turlari keltirilgan. Turlari sharoitida jarayonning kimyosi ko'rsatilgan, shu bilan bir qatorda gipsni utilizatsiyasi ko'rib chiqilgan. Prinsipial texnologik jarayon sxemalarini, tavsifi, kamchiliklari va quloyliklari keltirilgan. Texnologik jarayonlarini parametrlarini taqqoslovchi jadvallar keltirilgan. Maqolada mavjud fosfor kislotasini ekstraksiya jarayonini rekonstruksiya va takamilashtirish bo'yicha amaliy takliflar berilgan.

Soz'lar: estraksion fosfor kislotasi, fosforitlar, apatitlar, filtrasiya, kristllizasiya, digidrat prosessi, polugidrat prosessi, ангидрит prosessi.

Фосфорная кислота является важнейшим промежуточным продуктом для производства фосфорных удобрений, кормовых добавок, инсектицидов и других фосфорсодержащих продуктов. Общее мировое потребление природных фосфатов в настоящее время составляет более 150 млн. т в год, при этом две трети добычи перерабатывается в фосфорную кислоту.

Известны два основных способа промышленного производства фосфорной кислоты: термический и экстракционный, применение которых зависит от требуемой чистоты продукта. Наиболее дорогостоящим является термический способ получения кислоты. Он основан на термическом сжигании фосфора в среде кислорода, при этом производственная кислота имеет концентрацию 85-86% H_3PO_4 и практически не содержит примеси. Экстракционный метод основан на сернокислотном разложении природных фосфатов. Здесь производственная кислота имеет 40%-ную концентрацию по P_2O_5 с наличием определённых примесей [1].

Существуют 3 режима сернокислотного разложения фосфатного сырья – дигидратный, полугидратный и ангидритный, в зависимости от образования сульфата кальция, который может быть получен в форме дигидрата, полугидрата и ангидрита соответственно. Следует отметить, что использование комбинаций этих режимов позволяет повысить на 2,0-2,5% (абс.) степень извлечения P_2O_5 , получить концентрированную кислоту (до 55%) и использовать сульфат кальция без дополнительной очистки для производства строительных материалов. В этом случае процесс на первой стадии ведут с выделением в твёрдую фазу полугидрата или дигидрата, а во второй стадии перекристаллизовывают полугидрат в дигидрат или дигидрат в полугидрат [2].

Применяя различные режимы разложения фосфатного сырья, а также их комбинации, можно спроектировать различные типы производства экстракционной фосфорной кислоты, но в Европе наиболее распространенными являются следующие типы процессов:

- Дигидратный процесс;
- Полуидридатный процесс;
- Дигидратно-полуидридатный процесс (двухуровневый);
- Полуидридатный процесс (одноуровневый);
- Полуидридатный процесс (двухуровневый).

Применение различных режимов сернокислотного разложения обусловлено использованием различных горных пород, в которых содержание P_2O_5 различается (Табл.1.) [3].

Таблица 1.

(Данные химического анализа различных фосфатных пород)

	Россия*	Казахстан (Каратау)	Узбекистан (Кызылкум)	Ю. Африка Пхалаборва*	Марокко Хурибга	США Флорида	Сенегал	Того
Содержание фосфорнокислого кальция(номинал.), %	84	61		80	73	75	80	80
Состав, % (масс.)								
P_2O_5	38.9	24.5	18.56	36.8	33.4	34.3	36.7	36.7
CaO	50.5	39.0	45.49	52.1	50.6	49.8	50.0	51.2
SiO ₂	1.1	-		2.6	1.9	3.7	5.0	4.5
F	3.3	3.0	2.16	2.2	4.0	3.9	3.7	3.8
CO ₂	0.2	8.0	16.18	3.5	4.5	3.1	1.8	1.6
Al ₂ O ₃	0.4	1.2	2.83	0.2	0.4	1.1	1.1	1.0
Fe ₂ O ₃	0.3	1.7	2.09	0.3	0.2	1.1	0.9	1.0
MgO	0.1	3.5	1.00	1.1	0.3	0.3	0.1	0.1
Na ₂ O	0.4	0.3	0.85	0.1	0.7	0.5	0.3	0.2
K ₂ O	0.5	0.3	0.11	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Органика				0.1	0.3	0.5		
Органический углерод	0.1					0.2	0.4	0.1
SO ₃	0.1		2.05	0.2	1.6	0.1		0.3
Cl			0.18		0.1			0.1
SrO	2.9			0.3	0.1			
Прочие примеси, мг								
Редкоземельные металлы	6,200			4,800	900	600		
U ₃ O ₈	11			134	185	101	124	
As	10			13	13	11	18	12
Cd	1.2			1.3	15	9	53	53
Cr	19			1	200	60	6	
Cu	37			102	40	13		
Hg	33			0.1	0.1	0.02	0.2	0.6
Ni	2			2	35	28		
Pb				11	10	17	5	
Zn	20			6		200-400	70	

* Вулканические породы

В настоящее время известно около 200 минеральных образований, содержащих фосфаты. Наиболее важными из них являются следующие [4]:

- Апатиты $3Ca_3(PO_4)_2 \cdot Ca(F, Cl, OH)_2$ в апатитовых рудах;

- Фосфориты $3Ca_3(PO_4)_2 \cdot Ca(OH)_2$ в фосфоритовых рудах.

Фосфориты обычно содержат больше примесей, чем апатиты, поэтому для использования фосфоритов в качестве фосфатного сырья в производстве экстракционной фосфорной кислоты может потребоваться обогащение руды, что в большинстве случаев затрудняет их эффективное применение.

Например, кызылкумские фосфориты наряду с высокой степенью карбонатизации (кальциевый модуль $CaO:P_2O_5 = 2.85$) характеризуются сложной технологией добычи фосфорного сырья. Содержание хлора в кызылкумских фосфоритах даже после промывки приводит к коррозии и износу технологического оборудования и коммуникаций. Необходимо обогащать руду путём энерго- и ресурсоёмких промывки и обжига, при которых вымывается часть хлора, но в отвал уходит 35-40% массы в виде шлама с содержанием P_2O_5 8-9%. При обработке руды из фосфоритов Кызылкума в производстве экстракционной фосфорной кислоты на 20-25% увеличивается расход серной кислоты (по сравнению с фосфоритами Каратау Казахстана, в которых нет хлора, а модуль $CaO:P_2O_5 = 1.57$), а это в свою очередь приводит к увеличению объёма фосфогипса на столько же процентов.

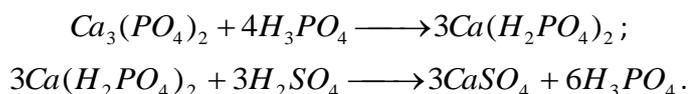
В настоящее время Кызылкумский фосфоритовый комбинат производит добычу фосфоритов: в начале осуществляет их обогащение на рудоконтрольной станции, затем промывку сырья от хлора и далее обжиг для разложения карбонатов и удаления углекислоты. Он производит 716 тыс. тонн мытого обожжённого фосфоконцентрата в год с содержанием 26% P_2O_5 и с кальциевым модулем $CaO:P_2O_5 =$ равным 2,05. Но такая сложная и затратная технология добычи, обогащения и производства делает неконкурентными на мировом рынке получаемые фосфорные удобрения.

Наиболее упрощённо химический процесс производства фосфорной кислоты можно описать следующим образом. Трикальция фосфат, содержащийся в фоссырье, за счёт его взаимодействия с концентрированной серной кислотой преобразуется в фосфорную кислоту и нерастворимый сульфат кальция (гипс).



В реакторах обеспечивается интенсивное перемешивание по всему объёму. Производственная линия может состоять из последовательности отдельных перемешивающих реакторов для сокращения времени на разложение фосфатов, но в целях экономии пространства и капитальных затрат на строительство они могут быть заменены на один реактор. Нерастворимый сульфат кальция отделяется от фосфорной кислоты фильтрацией.

Реакция между фосфоритом и серной кислотой со временем останавливается, т.к. формируется нерастворимый слой сульфата кальция в реакционной смеси, который препятствует дальнейшему протеканию реакции. Эту проблему можно свести к минимуму, предварительно осуществив контакт фоссырья с рециркулирующей фосфорной кислотой для преобразования нерастворимого сульфата кальция в максимально возможной степени растворимый фосфат монокальция, а затем - произвести его осаждение в виде сульфата кальция с использованием серной кислоты:



Как было уже сказано, сульфат кальция может существовать в различных кристаллических формах в зависимости от количества присоединённых молекул воды — дигидрат ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), полугидрат ($CaSO_4 \cdot 0.5H_2O$) и ангидрит ($CaSO_4$). Образование

той или иной формы сульфата кальция главным образом зависит от преобладающих температурных условий, концентрации P_2O_5 и содержания серной кислоты (Рис.1) [5].

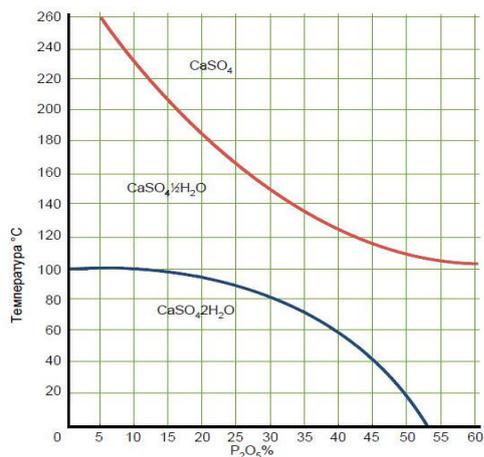


Рис. 1. Зависимость кристаллизации сульфата кальция от температуры и P_2O_5

Условия проведения процесса подбираются исходя из условий оптимального управления [6, 7] с целью обеспечения выпадения сульфата кальция в осадок, обычно в форме дигидрата или полугидрата, т.е. с 26-32%-ным содержанием P_2O_5 при температуре 70-80 °С для дигидратного процесса или с 40-52%-ным содержанием P_2O_5 при температуре 90-110 °С для полугидратного процесса.

Содержание фтористых соединений во многих фосфатных породах колеблется в пределах 2-4% (масс.). Одновременно с фосфатом кальция серной кислотой разлагаются примеси, при этом нефелин, глауконит, каолин разлагаются с образованием сульфатов и диоксида кремния, причём выделившийся диоксид кремния реагирует с выделяющимся по основной реакции фторидом водорода с образованием кремнефтористоводородной кислоты [4]. Другие элементы, такие как магний и алюминий, также реагируют с HF, формируя соединения $MgSiF_6$ и H_3AlF_6 . Часть фтора уносится вместе с паром, в зависимости от условий проведения реакции, другая часть – остаётся в кислой среде. Некоторая оставшаяся часть фтора с другими примесями достаточно быстро может уйти в осадок, который впоследствии удаляется с помощью фильтра, что способствует более лучшему формированию осадка в дальнейшем. Большая часть летучих фтористых соединений появляется в выхлопных парах из испарителей при концентрировании фосфорной кислоты.

Огромное внимание уделяется наличию другой группы примесей, таких как: мышьяк, кадмий, медь, свинец, никель, цинк и ртуть, которые часто содержатся в фосфоритах и могут попасть в продукционную кислоту [8]. Некоторые фосфориты также содержат природный уран и целый ряд радиоактивных соединений урана. Уран попадает в раствор продукта, а также осаждается с фосфогипсом. Примеси, содержащие железо, алюминий, натрий, калий, хлор и т.д., оказывают негативное влияние на процесс получения фосфорной кислоты и на качество продукта. Для повышения качества продукции, а также снижения вреда для окружающей среды возникает необходимость в дополнительной очистке от примесей, причём качество очистки продукции будет зависеть от способа проведения процесса.

Рассмотрим более подробно основные способы проведения процесса получения экстракционной фосфорной кислоты.

Дигидратный процесс (ДП) – наиболее распространённый способ. Он включает четыре стадии: размол породы, проведение реакции, кристаллизация и концентрация (Рис.2).

Некоторые марки используемого сырья (апатит) не нуждаются в размолу, т.к. их дисперсный состав является приемлемым для проведения реакции (60-70% всех частиц имеют размер меньше 150 мкм). Большинство других фосфоритов нуждаются в уменьшении размера твёрдых частиц, обычно для этого используют шаровые мельницы или конусные дробилки. Данные аппараты могут работать как с сухой, так и с влажной породой.

Эксплуатационными условиями для осаждения дигидрата являются концентрация P_2O_5 26-32% и температура 70-80°C. (Рис.1). Температура контролируется за счёт прохождения пульпы через вакуумный холодильник, который также осуществляет дегазацию пульпы и делает её более подвижной для откачки насосами. Температура также может контролироваться за счёт рециркуляции воздуха.

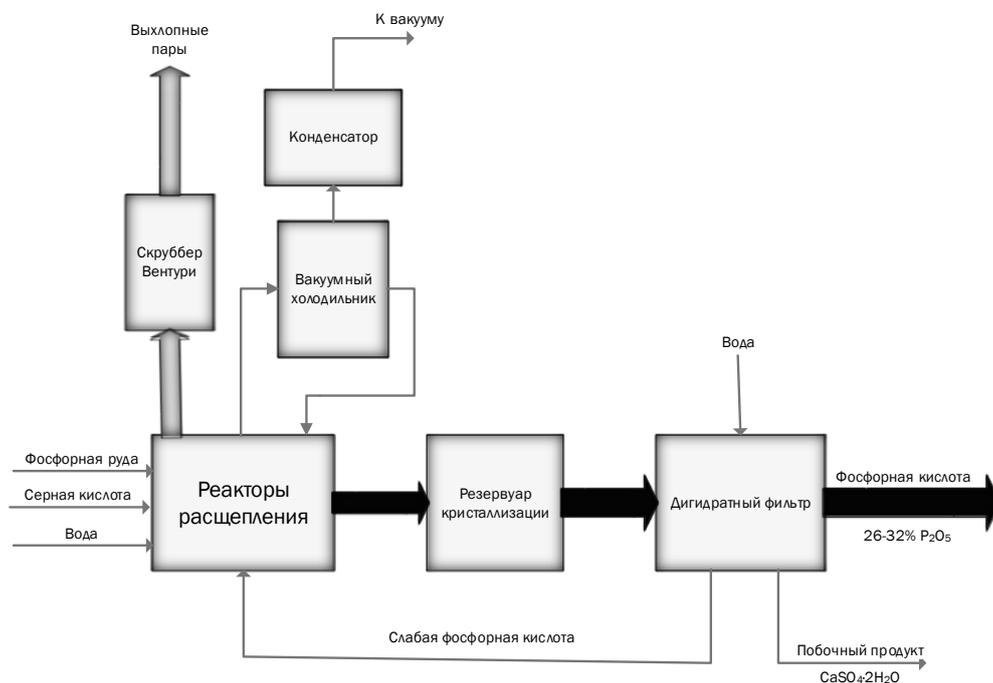


Рис. 2. Схема дигидратного процесса

Для концентрирования раствора применяют острый пар. Испарение происходит за счёт введения в кислоту греющего пара.

Дигидратные системы имеют следующие преимущества:

- отсутствие ограничений по качеству сырья;
- высокая оперативность управления;
- низкие рабочие температуры;
- лёгкие запуск и остановка процесса;
- возможность использования влажной породы (без затрат на сушку).

Недостатками дигидратного процесса являются:

- относительно низкая концентрация продукционной кислоты (26-32% P_2O_5);
- высокие энергетические затраты на помол сырья;
- высокие энергетические затраты на стадии концентрирования кислоты;
- унос 4-6% P_2O_5 вместе с фосфогипсом.

Полугидратный процесс (ПП) – процесс получения фосфорной кислоты, с условиями проведения процесса, при которых сульфат кальция осаждается в форме полугидрата. Данный процесс позволяет непосредственно производить кислоту с 40-52%-ным содержанием P_2O_5 и низкими энергетическими затратами. На рисунке 3 представлена упрощённая форма полугидратного процесса. Стадии процесса схожи со стадиями в дигидратном режиме, но размол руды более мелкий.

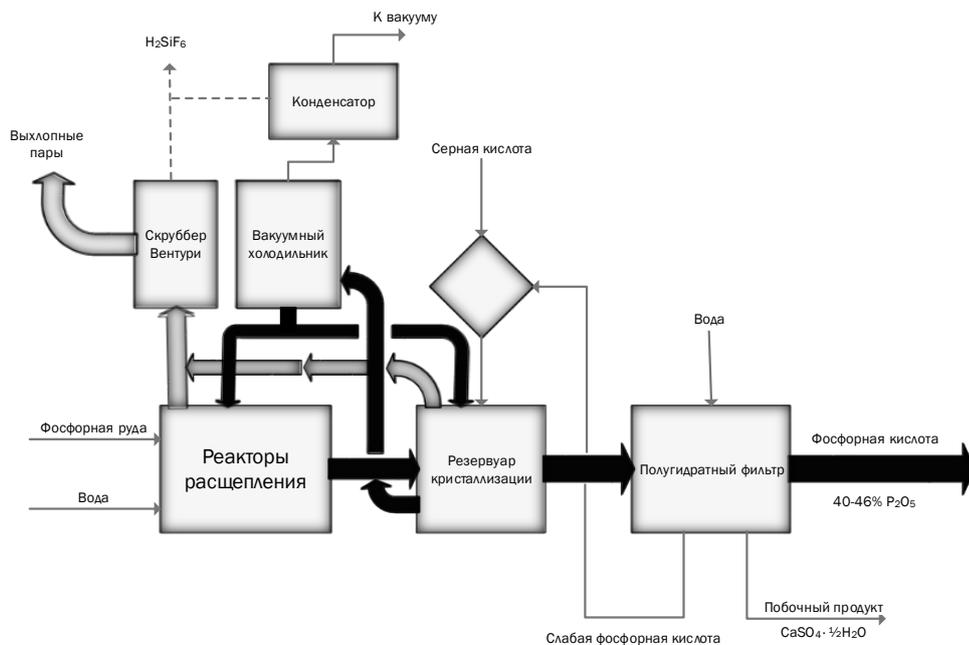


Рис. 3. Полугидратный процесс

Главными преимуществами этого процесса (кроме требований по снижению теплоты парообразования) являются:

- намного меньше капитальных затрат (особенно на энергетические ресурсы);
- более концентрированная кислота;
- низкие требования к размолу руды. В отличие от дигидратного процесса, требуемая скорость реакции при работе с более грубой породой достигается за счёт более суровых условий проведения реакции в полугидратном процессе.

Недостатками полугидратного процесса являются:

- низкая скорость фильтрации;

При этом формирование кристаллов полугидрата происходит легче, чем формирование дигидратных кристаллов. В то же время кристаллы полугидрата имеют меньшие размеры, что вызывает трудности при фильтровании, если только не используются кристаллические модификаторы для подавления чрезмерного зародышеобразования. Однако при правильном проведении процесса потребность в применении кристаллических модификаторов отпадает. Существуют некоторые виды фосфатных руд (апатит), из которых производят кристаллы полугидрата, подающиеся более быстрой фильтрации, чем при получении кристаллов дигидрата.

- потери P_2O_5 ;

Из соображений по рациональному использованию воды существуют ограничения по количеству использования промывочной воды, что приводит к увеличению количества растворимого и нерастворимого P_2O_5 , остающегося в гипсовой «лепёшке». Тем не менее, простота полугидратного производства, отсутствие фторсиликатов, отсутствие проблем с ростом кристаллов могут компенсировать потери нерастворимого P_2O_5 , уходящего с гипсом.

- кристаллизация;

Полугидрат – неустойчивая форма сульфата кальция и поэтому он имеет тенденцию перехода в форму гипса прежде, чем кислота будет подвергнута фильтрации. Иногда даже приходится проводить повторную гидратацию во время промывки. На хорошо спроектированном полугидратном заводе в реакторах подобных проблем нет. На одноступенчатом полугидратном производстве может потребоваться небольшое количество специальных веществ для подавления чрезмерного зародышеобразования кристаллов.

- примеси в фильтрованной «лепёшке»;

Выгруженная «лепёшка» является более кислой, чем гипс на фильтре из-за дополнительных потерь P_2O_5 , она также содержит фтор и кадмий.

- коррозия;

Требования к основному оборудованию для проведения процесса, в сравнении с дигидратным производством, увеличиваются из-за высокой температуры ($100\text{ }^\circ\text{C}$) и более высокой концентрации кислоты (40-50% P_2O_5).

В общем случае, наилучшие ожидаемые коэффициенты извлечения P_2O_5 в одноступенчатом дигидратном и полугидратном процессах колеблются в пределах 94-96% и 90-94% соответственно. Потери P_2O_5 с гипсом при фильтрации могут создать проблемы по утилизации или использованию отходов. Часть этих потерь переходит в раствор и может регенерироваться при окончательном разделении сульфата кальция, но только при условии, что сульфат кальция перекристаллизуется в другой гидрат. Это не только увеличивает коэффициент полезного действия, но и даёт возможность получить более очищенный сульфат кальция. Разработано [2] несколько комбинированных процессов рекристаллизации, но основными являются три:

- **процесс полугидратной рекристаллизации (ППР)** — подкисление при полугидратных условиях; рекристаллизация в дигидрат без промежуточного полугидратного разделения; отделение продукта;
- **полудигидратный процесс (ПДП)** — подкисление при полугидратных условиях; отделение продукта; рекристаллизация полугидрата в дигидрат; фильтрация и возврат пульпы в процесс;
- **дигидратно-полугидратный процесс (ДПП)** — подкисление при дигидратных условиях; отделение продукта; рекристаллизация в полугидрат; фильтрация и возврат пульпы в процесс.

ППР. Технологическая схема этого процесса похожа на дигидратный процесс с каскадом реакторов (Рис. 2), за исключением того, что первый реактор функционирует при полугидратных условиях, в то время как последующие реакторы функционируют под условиями, которые осуществляют повторную гидратацию полугидрата в гипс. Это обеспечит новое зарождение кристаллов дигидрата в растворе после прохождения через фильтр. Продукционная кислота имеет ту же концентрацию, что и при дигидратном процессе, но с более чистым гипсом. Технологическая схема процесса показана на рисунке 4.

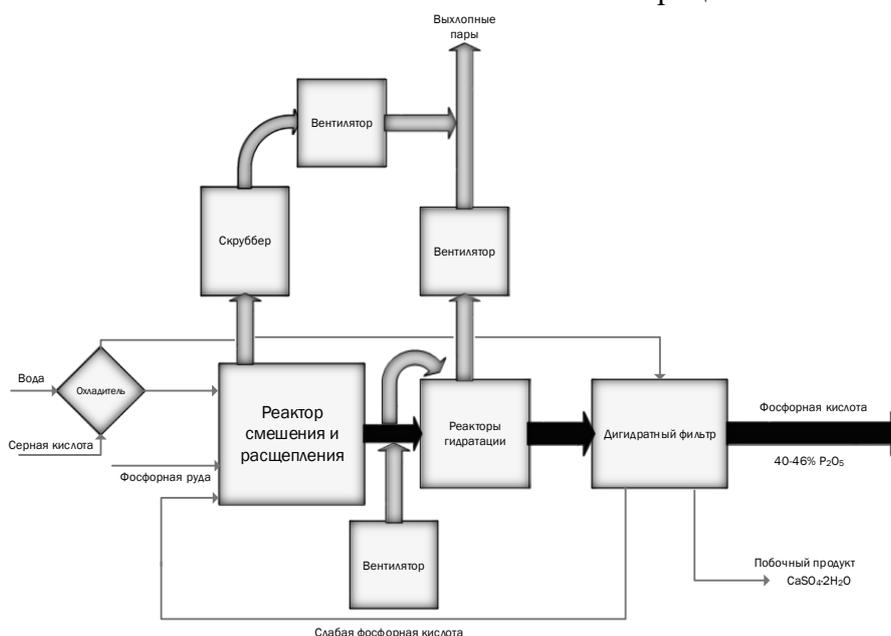


Рис. 4. Процесс полугидратной рекристаллизации

Достоинствами ППР являются:

- производство чистого гипса;
- высокая степень извлечения P_2O_5 ;
- более высокая концентрация кислоты по сравнению с ДП (30-32% по P_2O_5);
- более низкое потребление серной кислоты;
- более низкая площадь фильтрующей поверхности.

Недостатки ППР:

- требуется хороший размол породы;
- требуется разбавление серной кислоты;
- необходим дополнительный реактор для рекристаллизации;
- необходимы дополнительные хранилища для 32%-ной фосфорной кислоты и для дальнейшего выпаривания.

ПДП. [9-11] В этом процессе можно непосредственно получить кислоту с 40-52% содержанием P_2O_5 , расщепляя фоссырьё при полугидратных условиях и отделяя полугидрат перед кристаллизацией. Дополнительный фильтр и другое необходимое оборудование увеличат капитальные затраты производственного предприятия, но это позволит сэкономить на оборудовании для испарения [12]. Технологическая схема процесса приведена на рисунке 5.

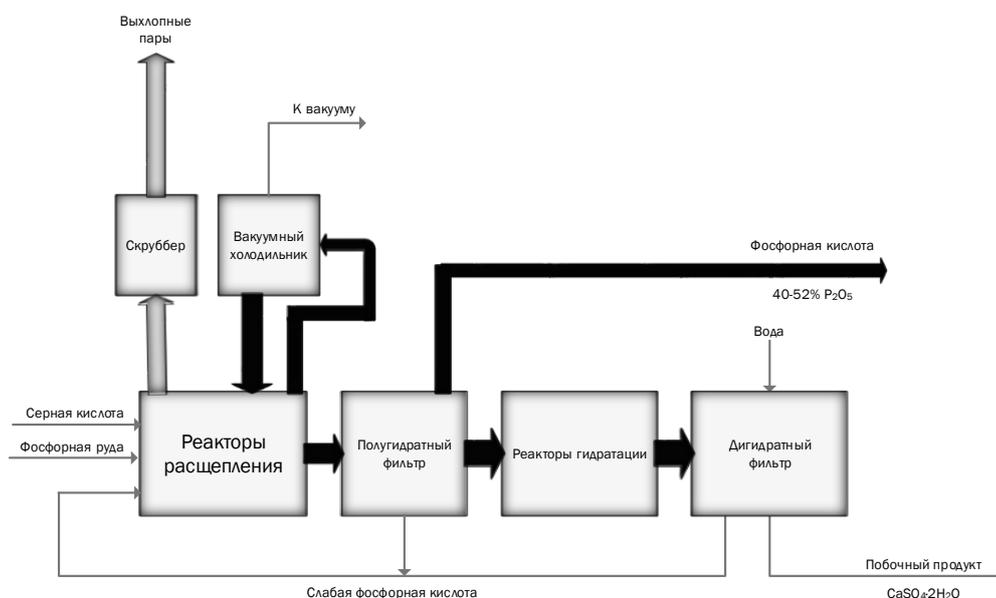


Рис. 5. Полудигидратный процесс

Достоинства ПДП:

- непосредственное производство высококонцентрированной кислоты (40-52% по P_2O_5);
- производство более чистой продукционной кислоты с низким содержанием SO_4 , Al, F;
- возможность использования руды грубого помола;
- меньшее потребление серной кислоты;
- высокая степень извлечения P_2O_5 (98.5%);
- производство более чистого гипса.

Недостатки ПДП:

- не все типы фосфорной руды, обрабатываемой в промышленных масштабах, могут быть применены;
- необходимость в дополнительном реакторе для рекристаллизации;
- более высокие капитальные затраты.

ДПП. Хотя в данном процессе реакция и протекает при дигидратных условиях, но здесь не производится очень высокая степень извлечения P_2O_5 во время разделения кислоты от дигидрата. Последующая стадия дегидратации требует 20-30%-ной кислоты по P_2O_5 и 10-20% серной кислоты. Содержание P_2O_5 в производственной кислоте колеблется в пределах 32-35%. Технологическая схема процесса приведена на рисунке 6.

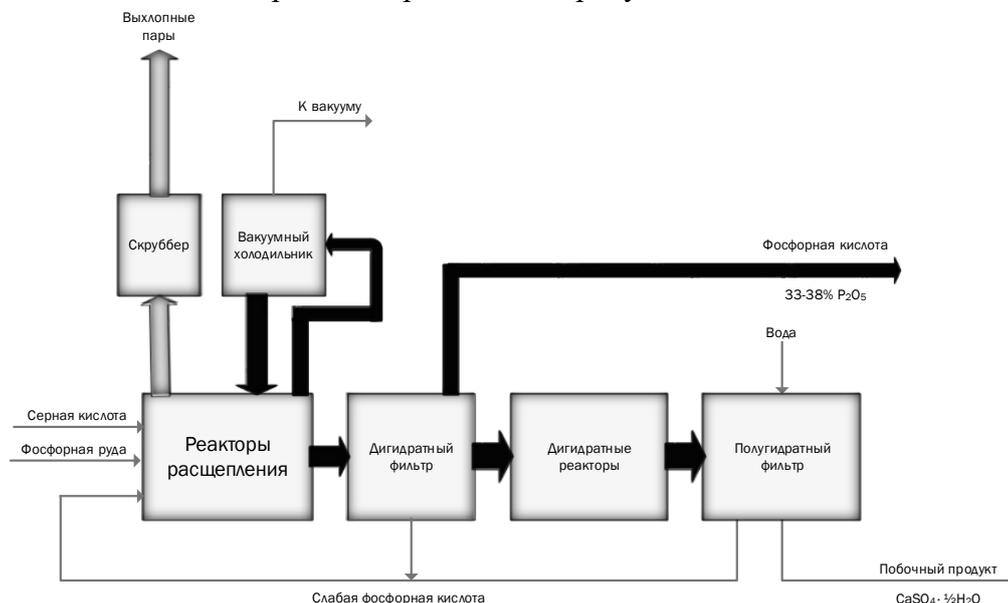


Рис. 6. Дигидратно-полуидратный процесс

Достоинствами ДПП являются:

- гибкость к качеству фосфорной руды;
- более высокая концентрация кислоты по сравнению с ДП и ППР (32-36% по P_2O_5);
- гипс может быть использован непосредственно как вяжущий материал в строительстве, для производства гипсокартона и др.

Недостатки ДПП:

- недопустимо осуществление рециркуляции пульпы;
- необходим дополнительный реактор для рекристаллизации;
- необходимы дополнительные хранилища для 35%-ной фосфорной кислоты и для её дальнейшего выпаривания.

Отдельно от всех вышеперечисленных процессов следует упомянуть об ангидритном процессе. **Ангидритный процесс (АП)** – процесс, в условиях которого сульфат кальция осаждается в форме ангидрита (при температуре в реакторах разложения выше $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ с концентрацией P_2O_5 более 55%). Этот процесс имеет известные преимущества перед другими:

- непосредственно в процессе экстракции может быть получена кислота, содержащая до 50% P_2O_5 ; при этом практически отпадает необходимость её упарки для производства фосфорсодержащих удобрений или требуется только частичная упарка;
- при экстракции в газовую фазу выделяется большая часть фтора;
- образующийся фосфоангидрит легче перерабатывать, в частности, в серную кислоту, так как отпадает необходимость промывки его от примесей P_2O_5 и фтора, а также сушки;
- получаемая кислота менее загрязнена сульфатом кальция.

Недостатками этого способа являются жёсткие коррозионные условия (высокие температуры и концентрации фосфорной кислоты), получение мелких кристаллов, что обуславливает низкие удельные съёмы с поверхности фильтрации и необходимость большого числа ступеней противоточной промывки. Поэтому промышленное производство

экстракционной фосфорной кислоты по прямому ангидритному способу в мире не применяется [4].

Ниже представлена таблица для сравнения различных процессов.

Таблица 3.

(Сравнение ДП, ПП и ПДП по 5-ти балльной шкале)

Критерий	ДП	ПП	ППР	ПДП	ДПП	Замечания (для типичных ситуаций)
Капитальные затраты, реактор и фильтры	5	4	3	2	3	При ДП используется самый маленький реактор. В ППР, ПДП и ДПП имеется 2 уровня: рекристаллизации и фильтрации
Капитальные затраты, другие секции	2	5	2	5	2	ПП и ПДП не нуждаются в размоле породы, меньше выпариваний и охлаждающей воды, небольшое кислотное хранилище
Эксплуатационные расходы и прибыль	2	4	3	5	3	Для ДП, ППР и ДПП необходимо измельчение породы и доп. выпаривание. ПДП: высокая степень извлечения
Энергетическая эффективность всего завода	1	5	2	4	1	Для ДП, ППР и ДПП нужен размол породы, требуется большое количество пара и охлаждающей воды
Концентрация производной кислоты	1	4	2	5	3	ДП 25-29% P ₂ O ₅ , ПП 40-45%, ППР 30-32%, ПДП 40-50%, ДПП 32-36%
Концентрирование и требования к пару	1	4	1	4	1	С ПП и ПДП производят диаммоний фосфат без концентрирования или с небольшим концентрированием
Степень извлечения P ₂ O ₅ на фильтре	3	2	4	5	4	ДП ~96%, ПП ~95%, ППР ~97%, ПДП ~98,5, ДПП ~97%
Потери P ₂ O ₅ , кроме потерь на фильтре	3	4	3	3	4	С ПП и ПДП нет 27%-ной кисл. концентрации. С ПДП имеем доп. рекристаллизатор и фильтр
Восстановление потерь с помощью оборотной воды	3	5	2	1	2	Работает только там, где вода рециркулирует со стадии получения гипсовой «лепёшки»
Потребление серной кислоты	3	3	5	5	4	2%-ая прибыль в ПП и ПДП благодаря низкому содержанию SO ₄ в продукте и др.
Требования к помолу руды	1	4	1	4	1	Для ДП, ППР, ДПП требуется руда размером <0.4 мм, ПП и ПДП могут использовать <2мм
Требования к охлаждающей воде	2	4	3	4	3	В ПП и ПДП нет необходимости повышать концентрацию производной кислоты до 42%
Очищение продукта, хранение	1	4	2	4	2	В ПП и ПДП производная кислота имеет конц-ю значительно превышающую, конц-ю в ДП и поэтому обычно не нуждается в очистке
Чистота производной кислоты	2	4	3	4	3	Из к-ты, полученной на ПП и ПДП, изготавливают удобрения с содержанием P ₂ O ₅ на 2% выше
Соотношение ёмкость/размеры оборудования	4	3	2	2	2	Оборудование для ДП занимает намного меньше места. Для ПДП требуется доп. реактор и фильтры
Требования к реактивам	4	3	4	3	4	Для ПП может потребоваться кристаллические модификаторы. В ПП и ПДП можно использовать глину или песок
Степень изученности процесса и опыт эксплуатации	5	4	5	3	5	Наиболее известны ДП, ППР, ДПП менее изучены ПП и ПДП
Сложность процесса	2	4	2	2	2	Для ДП, ППР, ДПП требуются размол, концентрирование и т.д. ПДП имеет доп. реактор и фильтры
Возможность извлечения урана	4	0	1	5?	1	При ПДП наилучшие результаты, но необходима доп. разработка проекта
Утилизация гипса	2	2	3	4	4	Гипс при ПДП, ДПП является самым чистым
Степень извлечения кремнефтористоводородной кислоты	4	2	3	2	3	У ПП и ПДП нет стадии концентрирования до 27-42%, следовательно меньше фторсодержащих газов

Рассматривая вопрос о необходимости модернизации существующего дигидратного производства до полугидратного или полудигидратного, можно отметить тот факт, что для полугидратного процесса не требуется концентрирование продукционной кислоты. Огромное количество греющего пара, которое было необходимо для концентраторов в дигидратном процессе, теперь становится невостребованным, поэтому решение преобразования производства в большей степени основывается на том, сколько ресурсов можно сэкономить, минуя этап концентрирования.

Дальнейшее преобразование процесса в полудигидратный несёт в себе большие затраты для дополнительного реактора и средств фильтрации. В данном случае прибыль, покрывающая расходы, может быть достигнута за счёт эффективности процесса, которая связана с 98-99%-ной степенью извлечения. Повышение стоимости фосфорной руды и серной кислоты делают полудигидратный процесс особенно привлекательным.

Список литературы

1. Pierre Becker. Phosphates and Phosphoric Acid. Section 2.1.2. Published by Marcel Decker, 1983
2. Копылев Б.А. Технология экстракционной фосфорной кислоты. — Л.: Химия, 1981. — 224с.
3. European Fertilizer Manufacturers' Association (EFMA). Production of phosphoric acid. Booklet No. 4 of 8, 2000.
4. С.Д. Эвенчик, А.А. Бродский. Технология фосфорных и комплексных удобрений. — М.: Химия, 1987, 464с.
5. Позин М.Е. и др. Технология минеральных солей (удобрений, пестицидов, промышленных солей, окислов и кислот), ч.II. — Л.: Химия, 1974.
6. Юсупбеков Н.Р., Гулямов Ш.М., Касымов С.С. Вычислительные системы и управление производством. – Ташкент: Узбекистон, 1984.
7. Юсупбеков Н.Р., Ризаев Н.У., Юсипов М.М. Основы оптимизации экстракционной и ионообменной технологии. – Ташкент: Фан, 1975.
8. 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, 304с.
9. J. David Crerar & Barry T. Crozier, "Practical Retrofitting to the Hemihydrate Process and Plant Performance Data", AIChE Meeting, Lakeland FL, Mar. '87.
10. B.T. Crozier, "Fisons Hemihydrate Process - A Decade of Energy Savings", The Fertilizer Institute Round Table, Atlanta, Oct. '82.
11. John Gobbitt, "Hemihydrate Phosphoric Acid Plant Retrofits at Geismar and Chinhae", AIChE Clearwater Convention, May, '90.
12. John Wing, "From Phosphate Rock to DAP at Lower Cost", AIChE Clearwater Convention, May, '99.

Юсупбеков Надирбек Рустамбекович – доктор технических наук, академик АН РУз, профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов» ТашГТУ.

Тел. +998712461716

Мухитдинов Джалолитдин Пахритдинович – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов» ТашГТУ.

Тел. +998946042380

Шульц Алексей Викторович – магистр кафедры «Автоматизация производственных процессов» ТашГТУ.

Тел. +998936051311