

Моделирование и оптимизация сульфатного режима в технологическом процессе производства экстракционной фосфорной кислоты при изменении нагрузки на экстрактор по апатиту

В.А. Кривоносов¹, О.Ф. Козырь¹, В.В. Соколов²

¹*Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»»*

²*Череповецкий государственный университет*

Аннотация: Рассматривается математическое моделирование и оптимизация процесса управления сульфатным режимом при изменении нагрузки по апатиту на экстрактор фосфорной кислоты. Показано, что сохранение соотношения «серная кислота/апатит» при резком изменении расхода апатита приводит к нарушению технологического регламента по SO_3 . Разработан алгоритм коррекции этого соотношения в переходном режиме, сводящий к минимуму вероятность нарушения регламентных показателей. Предложен вариант реализации процедуры оптимальной коррекции нагрузки по апатиту с помощью автономных сценариев. Результаты подтверждены в ходе имитационного моделирования.

Ключевые слова: алгоритм, математическая модель, стабилизация сульфатного режима, экстракционная фосфорная кислота, изменение нагрузки на экстрактор, коэффициент выхода фосфора из апатита, оптимизация, автономные сценарии.

Сернокислотная экстракция фосфорной кислоты из апатитового концентрата является сложным, весьма инерционным процессом [1, 2], включающим разложение апатита серной кислотой с выделением в жидкую фазу фосфорного ангидрида и кристаллизацией из пульпы сульфата кальция в форме фосфогипса (дигидрат сульфата кальция, образующийся при дигидратном способе производства) или полугидрата сульфата кальция при полугидратном производстве. Одним из основных показателей эффективности технологического процесса является коэффициент выхода $K_{\text{ВЫХ}}$ фосфорного ангидрида из апатита, который, в свою очередь, определяется произведением степени разложения $K_{\text{РАЗ}}$ апатита и коэффициента отмывки $K_{\text{ОТМ}}$ фосфогипса от фосфорной кислоты на фильтрах. Высокая степень разложения апатита и формирование изометрических кристаллов фосфогипса, обеспечивающих хорошую

отмывку фосфорной кислоты на фильтре, достигается при стабилизации оптимальных значений следующих технологических параметров пульпы в экстракторе [1, 3, 4]:

- C_{SO_3} - концентрация SO_3 – серного ангидрида в жидкой фазе пульпы;
- $C_{P_2O_5}$ - концентрация P_2O_5 – фосфорного ангидрида в жидкой фазе;
- $C_{ТВ}$ – концентрация твердой фазы в пульпе;
- $H_{ПУЛ}$ – уровень пульпы в экстракторе;
- $\theta_{ПУЛ}$ – температура пульпы.

Наиболее жесткие требования к качеству стабилизации предъявляются по двум параметрам - C_{SO_3} и $\theta_{ПУЛ}$.

В современных АСУ ТП отделений экстракции стабилизация температуры пульпы реализуется автономными контурами регулирования за счет изменения расхода воздуха на аппарат воздушного охлаждения пульпы или коррекции глубины вакуума в вакуум-испарителях [2, 5], через которые прокачивается пульпа для охлаждения. Этим обеспечивается высокая точность регулирования.

Концентрация SO_3 в жидкой фазе пульпы определяется в результате экспресс-анализа проб пульпы, отбираемых из экстрактора 1 раз в 2 часа. Кроме того, осуществляется косвенный контроль C_{SO_3} по результатам непрерывного измерения электропроводности, температуры и плотности пульпы [6]. Опыт работы показал, что результаты непрерывного контроля C_{SO_3} по электропроводности пульпы носят скорее индикативный характер (показывают тенденцию концентрации SO_3 к росту или падению) и имеют сравнительно невысокую точность численной оценки этого показателя. Поэтому для оценки текущего уровня SO_3 в жидкой фазе целесообразно использовать наблюдатель состояния [7], построенный на основе математической модели процесса экстракции [8].

Для облегчения стабилизации оптимальной концентрации SO_3 в АСУ ТП процесса экстракции [5, 9], как правило, реализован контур автоматического поддержания соотношения расходов серной кислоты ($F_{H_2SO_4}(t)$) и апатита ($x(t)$) на входе агрегата. Уставка по соотношению $\alpha(t) = F_{H_2SO_4}(t)/x(t)$ задается оператором с учетом результатов экспресс-анализа проб пульпы, оценок, сформированных наблюдателем состояния, и может корректироваться по данным прибора, измеряющего электропроводность. В установившемся режиме функционирования экстрактора при стабильной нагрузке, когда колебания расхода апатита не превышают ± 2 т/ч, такой подход обеспечивает достаточно высокую точность стабилизации C_{SO_3} .

Однако нагрузка на экстрактор по апатиту может на какое-то время существенно изменяться. Так, например, в технологической линии производства экстракционной фосфорной кислоты (ЭФК) при номинальной нагрузке пульпа из одного экстрактора может подаваться на 2 вакуум-фильтра. При временной остановке одного из фильтров для технического обслуживания, расход пульпы на фильтр, а также нагрузка по апатиту на экстрактор могут снижаться на 50 % в течение времени технического обслуживания фильтра. После запуска второго фильтра нагрузка на экстрактор возвращается к номинальному значению.

Исследования [1, 2] показали, что разложение апатитового концентрата в среде пульпы экстрактора длится 15 – 20 минут для полугидратного процесса и 20 – 30 минут для дигидратного. При этом математическая модель изменения количества апатита $y(t)$, разлагающегося в единицу времени, в зависимости от расхода $x(t)$ апатита в экстрактор с высокой точностью может быть описана следующим дифференциальным уравнением первого порядка

$$T \cdot \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K_{PA3}(t) \cdot x(t), \quad (1)$$

Где $K_{PA3}(t)$ – конечное значение коэффициента разложения апатита, поступившего в экстрактор в момент t . Значение $K_{PA3}(t)$ зависит от текущих технологических параметров пульпы экстрактора и от динамики их изменения. В установившемся регламентном режиме $K_{PA3}(t) \approx 0,975$. Нарушение технологического регламента может приводить к существенному снижению $K_{PA3}(t)$. К ухудшению разложения апатита приводят также резкие колебания C_{SO3} даже в пределах регламентного диапазона из-за ускоренной кристаллизации сульфата кальция на зернах апатита, что блокирует доступ серной кислоты к зерну, покрытому коркой фосфогипса;

T – постоянная времени процесса разложения. Для дигидратного процесса экстракции $T \approx 7$ мин, для полугидратного процесса $T \approx 5$ мин [1, 2].

Рассмотрим, как влияет изменение расхода апатита в экстрактор $x(t)$ на вес апатита $y(t)$, разлагающегося в единицу времени.

Пусть до момента времени $t = 0$ расход апатита в экстрактор $x(t)$ в течение достаточно продолжительного времени (более длительности разложения апатита, равной 30 мин) был постоянным и равным $x(0-)$. При этом количество апатита, разлагающегося в единицу времени, установилось на уровне $y(0) = K_{PA3}(0) \cdot x(0-)$. В момент $t = 0$ расход $x(t)$ резко изменяется до $x(0+)$ и удерживается на этом уровне в течение времени разложения апатита. Изменение количества апатита $y(t)$, который разлагается в единицу времени при $t \geq 0$, определим в результате решения дифференциального уравнения (1).

$$y(t) = x(0+) \cdot K_{PA3}(t) + (x(0-) \cdot K_{PA3}(0) - x(0+) \cdot K_{PA3}(t)) \cdot e^{-\frac{t}{T}}. \quad (2)$$

В качестве примера рассматривается экстрактор, состоящий из двух последовательно соединенных баков, рабочий объем каждого из которых составляет 450 м^3 . Первый бак – основная зона разложения апатита, второй – зона формирования и роста кристаллов сульфата кальция. Предположим, что

$K_{PA3}(t) = K_{PA3}(0) = 0,975$; $x(0-) = 40$ т/ч; $x(0+) = 80$ т/ч; $C_{SO_3}(0) = 16$ г/дм³.

Технологический регламент требует поддержания $C_{SO_3}(t)$ в диапазоне 12 – 20 г/л. При этом и до момента $t = 0$, и после увеличения нагрузки поддерживается постоянное отношение $F_{H_2SO_4}(t)/x(t) = 0,69$. Тогда графики изменения $x(t)$, $y(t)$, $F_{H_2SO_4}(t)$ и $C_{SO_3}(t)$ в жидкой фазе пульпы имеют вид, представленный на рисунке 1.

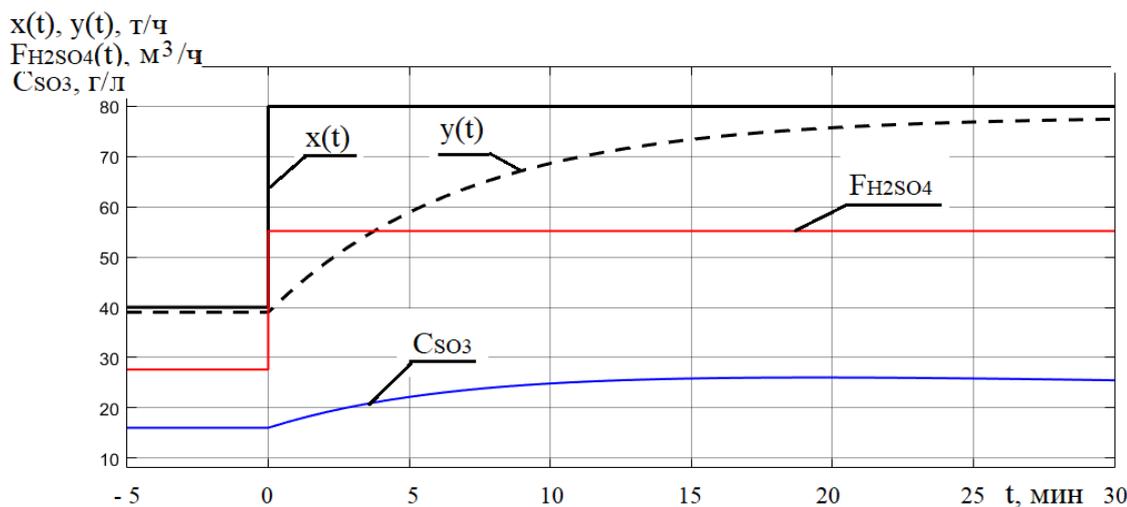


Рис. 1 – Графики переходных процессов, вызванных увеличением нагрузки по апатиту при постоянном соотношении $F_{H_2SO_4}(t)/x(t)$

Анализ графиков показывает, что увеличение расхода апатита в экстрактор при сохранении соотношения $F_{H_2SO_4}(t)/x(t)$ приводит к росту $C_{SO_3}(t)$ в течение 20 минут. Это обусловлено тем, что при резком увеличении расхода апатита в 2 раза, расход SO_3 в экстрактор также возрастает вдвое, а вес апатита, разлагающегося в единицу времени, плавно нарастает в течение 30 минут. При этом уже через 3 минуты $C_{SO_3}(t)$ выходит за верхний предел регламента, а через 15 минут нарушение регламента достигает 6 г/л. Если учесть, что такое резкое повышение $C_{SO_3}(t)$ за столь короткое время приведет к снижению $K_{PA3}(t)$, то реальное повышение $C_{SO_3}(t)$ окажется еще более значительным.

Снижение расхода апатита с 80 т/ч до 40 т/ч приводит к аналогичному снижению $C_{SO_3}(t)$ и выходу за нижний предел регламента.

Для предотвращения отмеченных выше недостатков в первые 30 минут после изменения уставки $x_{уст}(t)$ по расходу апатита необходимо корректировать $F_{H_2SO_4}(t)$ в соответствии с изменением количества апатита $y(t)$, разлагающегося в единицу времени. При этом используется прогноз изменения величины $y(t)$, определяемый по формуле (2).

Пусть, например, в момент $t = 0$ уставка по расходу апатита $x_{уст}(t)$ изменилась с $x_{уст}(0-)$ на $x_{уст}(0+)$. До изменения $x_{уст}(t)$ контуром регулирования $F_{H_2SO_4}(t)$ поддерживалось соотношение $F_{H_2SO_4}(t)/x(t) = \alpha(0-)$. После изменения $x_{уст}(t)$ коэффициент соотношения $F_{H_2SO_4}(t)/x(t) = \alpha(t)$ будет определяться по следующей формуле

$$\alpha(t) = \alpha(0-) \cdot (x_{уст}(0+) - (x_{уст}(0+) - x_{уст}(0-)) \cdot e^{-\frac{t}{T}}). \quad (3)$$

Такая коррекция процесса управления расходом серной кислоты при изменении уставки по расходу апатита в экстрактор позволит избежать отклонения $C_{SO_3}(t)$ от заданного значения. Для рассмотренного выше примера графики изменения расходов и $C_{SO_3}(t)$ при изменении коэффициента $\alpha(t)$ по формуле (3) приведены на рисунке 2.

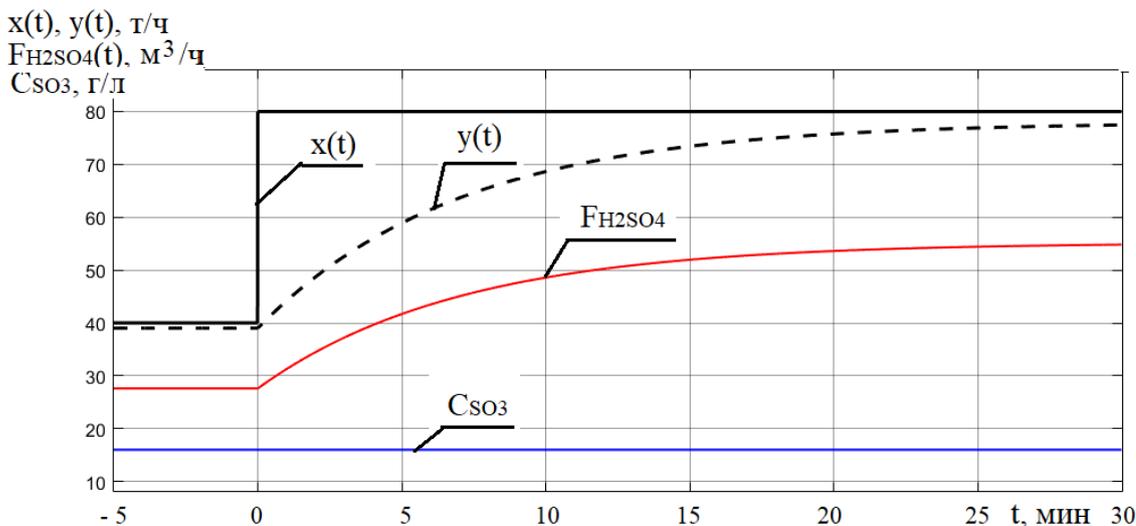


Рис. 2 – Графики переходных процессов при рациональном изменении соотношения $F_{\text{H}_2\text{SO}_4}(t)/x(t)$ после увеличения нагрузки по апатиту

Как видно из графиков, после ступенчатого увеличения подачи апатита в экстрактор, расход серной кислоты целесообразно плавно наращивать в течение 25 мин. При этом соотношение расходов $\alpha(t)$ должно изменяться в соответствии с формулой (3).

Процедура оптимальной коррекции $\alpha(t)$ при изменении нагрузки по апатиту в современной АСУ ТП может быть достаточно просто реализована программными средствами SCADA-системы [10] в виде автономного сценария [11, 12]. Такой сценарий позволит своевременно фиксировать моменты начала и окончания режимов изменения нагрузки, вычислять $\alpha(t)$ и формировать уставки для контура регулирования расхода серной кислоты.

Поддержание стабильной концентрации SO_3 способствует повышению коэффициента выхода фосфорного ангидрида из апатитового концентрата, что обеспечивает рост эффективности производства в целом.

Литература

1. Копылев Б. А. Технология экстракционной фосфорной кислоты. – 2-е изд., перераб. - Л.: Химия, 1981. - 224 с.
2. Петропавловский И.А., Дмитриевский Б.А., Левин Б.В., Почиталкина И.А. Химия и основы технологии минеральных удобрений: учебник — СПб: Проспект Науки, 2021. -344 с.
3. Pochitalkina I.A., Filenko I.A., Petropavlovskiy I.A. The method of control of acid's decomposition of phosphate raw materials. // European Science and Technology, April 23th – 24th, 2014. Vol. II. PP 547-551.
4. Dobrydnev S.V., Bogach V.V., Beskov V.S. Influence of surfactants on the rate of decomposition of apatites by mineral acids // Theor. Found. Chem. Eng. 2003. V. 37. № 4. p. 412.



5. Туманов Д.Н., Сунчелей И.Р., Гартман Т.Н. Оптимизация управления получением фосфорных кислот на примере цеха ЭФК ОАО «Воскресенские минеральные удобрения» // Промышленные АСУ и контроллеры. 2005. № 3. С. 5-8.

6. Земельман В.Б., Иванов М.И., Конкина В.М. Зависимость электропроводности пульпы и ее фильтратов от их состава в производстве экстракционной фосфорной кислоты// Химическая промышленность. – 1975. - №3. – С. 59-61.

7. Дат Во. К., Бобцов А.А. Адаптивный наблюдатель переменных состояния линейных нестационарных систем с параметрами, заданными не точно // Автоматика и телемеханика. 2020. № 12. С. 100-110

8. Кривонос В.А., Бабенков В.А., Соколов В.В. и др. Математическая модель процесса экстракции и фильтрации производства экстракционной фосфорной кислоты ООО «Балаковские минеральные удобрения» // Автоматизация в промышленности. 2013. № 7. С. 24-29.

9. Кривонос В.А., Бабенков В.А. Система управления технологическими параметрами процесса производства экстракционной фосфорной кислоты // Информационные системы и технологии. - 2015. - № 2 (88). - С. 73-80.

10. Андреева М.М., Шагапов И.Л., Соловьев Н.В., Нуретдинов И.И. Современные SCADA-системы в химико-технологической промышленности // Вестник Технологического университета. 2015. Т.18. № 2. С. 312-315

11. Филатов В.А., Кривонос В.А., Козырь, О.Ф. Модель поведения автономного сценария в задачах управления распределенными информационными ресурсами // Инженерный вестник Дона, 2013. № 3. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1771



12. Сироткин А.В. Управление формированием информационных потоков в вычислительной системе // Инженерный вестник Дона. 2011. № 4.
URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/593

References

1. Kopylev B.A. Tekhnologiya ekstraktsionnoy fosfornoj kisloty [Phosphoric acid extraction technology]. 2-ye izd., pererab. L: Khimiya, 1981. 224 p.
2. Petropavlovskiy I.A., Dmitrievskiy B.A., Levin B.V., Pochitalkina I.A. Khimiya i osnovy tekhnologii mineral'nykh udobreniy: uchebnik [Chemistry and fundamentals of mineral fertilizers technology: textbook]. SPb: Prospekt Nauki, 2018 – 312 p.
3. Pochitalkina I.A., Filenko I.A., Petropavlovskiy I.A. European Science and Technology, April 23th – 24th, 2014. Vol. II. Pp. 547-551.
4. Dobrydnev S.V., Bogach V.V., Beskov V.S. Theor. Found. Chem. Eng. 2003. V. 37. № 4. P. 412.
5. Tumanov D.N., Suncheley I.R., Gartman T.N. Promyshlennye ASU i kontrollery. 2005. № 3. Pp. 5-8.
6. Zemel'man V.B., Ivanov M.I., Konkina V.M. Khimicheskaya promyshlennost'. – 1975. - №3. – Pp. 59-61.
7. Dat Vo. K., Bobtsov A.A. Avtomatika i telemekhanika. 2020. № 12. Pp. 100-110.
8. Krivonosov V.A., Babenkov V.A., Sokolov V.V. i dr. Avtomatizatsiya v promyshlennosti. 2013. № 7. Pp. 24-29
9. Krivonosov V.A., Babenkov V.A. Informatsionnye sistemy i tekhnologii. 2015. № 2 (88). Pp. 73-80.
10. Andreeva M.M., Shagapov I.L., Solov'ev N.V., Nuretdinov I.I. Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta. 2015. T.18. № 2. Pp. 312-315



11. Filatov V.A., Krivinosov V.A., Kozyr' O.F. Inzenernyj vestnik Dona, 2013. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1771

12. Sirotkin A.V. Inzenernyj vestnik Dona, 2011. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/593