

DOI: 10.17516/1998-2836-0317

EDN: MUFLAK

УДК 631.82

The Study of Dissolution Kinetics of the Phosphate Concentrate from Rivat Deposit

Shodkom A. Qurbonov^{*a}, Behzod A. Obidov^b,
Kholmahmad I. Kholov^a and Shonavruz R. Samihov^a

*^aV.I. Nikitin Institute of Chemistry,
National Academy of sciences of the Tajikistan
Dushanbe, Republic of Tajikistan*

*^bTajik National University of Tajikistan
Dushanbe, Republic of Tajikistan*

Received 08.02.2022, received in revised form 06.10.2022, accepted 01.11.2022

Abstract. Conducted kinetic study of dissolution of the concentrate obtained from the phosphate ore of the Rivat deposit in technical phosphoric acid. To determine the kinetics and their interaction mechanism, we studied certain parameters, such as the stirring speed (300, 500 and 700 rpm), the concentration of phosphoric anhydride (25, 30 and 35 % P₂O₅), as well as the temperature (60, 70 and 80 °C). It should be noted that the rate of dissolution of phosphorite concentrate increases with an increase of studied parameters.

Due to the complexity of the dissolution of phosphates in mineral acids, this process has not fully explored. However, there are several different published materials on the kinetic model to describe this process, giving different expressions of the rate as a function of time. To study this process, the most suitable model is the shrinking core model. In this work, to calculate the rate constant *k* and the activation energy, we used solutions free of calcium sulfate.

Keywords: phosphate ore, phosphate concentrate, technical phosphoric acid, shrinking core model, dissolution rate, rate constant, activation energy.

Citation: Qurbonov, Sh.A., Obidov, B.A., Kholov, Kh.I., Samihov, Sh. R. The study of dissolution kinetics of the phosphate concentrate from Rivat deposit. J. Sib. Fed. Univ. Chem., 2022, 15(4), 548–559. DOI: 10.17516/1998-2836-0317



Исследование кинетики растворения фосфатного концентрата Риватского месторождения

Ш. А. Курбонов^а, Б. А. Обидов^б,
Х. И. Холов^а, Ш. Р. Самихов^а

*^аИнститут химии имени В. И. Никитина НАН Таджикистана
Республика Таджикистан, Душанбе*

*^бТаджикский национальный университет
Республика Таджикистан, Душанбе*

Аннотация. Проведено кинетическое исследование растворения концентрата, полученного из фосфатной руды Риватского месторождения в технической фосфорной кислоте. Показана зависимость скорости растворения от скорости перемешивания (300, 500 и 700 оборотов в минуту), концентрации фосфорного ангидрида (25, 30 и 35 % P₂O₅) и температуры (60, 70 и 80 °С). Установлено, что при увеличении скорости перемешивания от 300 до 700 об/ мин, концентрации от 25 до 35 % и температуры от 60 до 80 °С степень растворения увеличивается в 1,27; 1,3; 1,34 раза соответственно.

Из-за сложности исследования растворения фосфатов в минеральных кислотах этот процесс не до конца изучен. Все же существует несколько различных опубликованных материалов по кинетической модели для описания данного процесса, дающих разные выражения скорости в зависимости от времени. Для изучения данного процесса наиболее подходящей моделью является модель сжимающегося ядра. В нашей работе для расчета константы скорости *k* и энергии активации применялась данная модель с использованием растворов, не содержащих сульфата кальция.

Ключевые слова: фосфоритная руда, фосфатный концентрат, техническая фосфорная кислота, модель сжимающегося ядра, скорость растворения, константа скорости, энергия активации.

Цитирование: Курбонов, Ш. А. Исследование кинетики растворения фосфатного концентрата Риватского месторождения / Ш. А. Курбонов, Б. А. Обидов, Х. И. Холов, Ш. Р. Самихов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Химия, 2022, 15(4). С. 548–559. DOI: 10.17516/1998-2836-0317

Введение

Месторождение фосфоритной руды Риват расположено на южном склоне Туркестанского хребта. Он в виде узкой (широкой до 3 км) полосы, длиной 22 км, прослеживается вдоль правого берега реки Зеравшан. Месторождение состоит из двух участков: Хурми – Майкота протяженностью 18 км и Миндоне длиной по простиранию 4 км. Зерна фосфорита имеют чёрный, коричневый, зеленовато-серый и бурый свет, а на глубине – светло-серый цвет. В месторождении Ривата наиболее распространенная руда имеет осадочное происхождение и представляет собой карбо-

низированный фторапатит или франколит общей формулы [1]: $Ca_{10-n/2}[PO_4]_{6-n}(CO_3)_n(F, OH)_2H_2O$. Карбонатный фторапатит имеет скрытокристаллическую структуру во всех месторождениях Ривата. В кристаллической решетке апатита происходит несколько замещений [2], ион кальция может быть замещен на магний и натрий, а в некоторых более редких случаях – на кадмий.

Фосфорные удобрения обеспечивают растения питательными веществами для оптимального роста. Их получают при переработке фосфоритной руды, добытой из земли. Их все чаще производят в странах-производителях руды [3]. Фосфатная руда является основным сырьем при производстве многих химических продуктов, наиболее важные из которых – фосфорные удобрения. Процесс производства фосфорного удобрения осуществляется мокрым способом, который заключается в воздействии на фосфоритную породу серной и фосфорной кислотами. Эти кислоты можно вводить как одновременно, так и последовательно [4].

Реальная структура апатита в фосфоритной руде до сих пор не ясна [5]. Он считается фторапатитом $[Ca_{10}(PO_4)_6F_2]$. Основная реакция мокрого процесса получения фосфорного удобрения (суперфосфата) следующая:



Это уравнение является суммарной реакцией процесса и ее можно лучше понять, записав две отдельные стадии [6]:



На первом этапе при взаимодействии серной кислоты с фторапатитом образуется фосфорная кислота. На втором этапе фторапатит растворяют в фосфорной кислоте с получением монокальцийфосфата [7]. Это может произойти в любой момент времени, когда будет дефицит серной кислоты. Вероятно, реакция идет мгновенно на границе раздела между твердой фазой фосфатных частиц и жидкой фазой фосфорной кислоты [8].

Кинетика химических реакций, протекающих в гетерогенных химических системах, имеет специфические характеристики. Целью данного исследования является определение этих особенностей, выявление последовательности реакций, идущих в системе, и предложение методологии анализа кинетики данной гетерогенной реакции. Гетерогенный характер данного процесса обусловлен тем, что на границе раздела фаз протекает несколько реакций, ограничивающих и разделяющих различные фазы реакционной системы. При изучении гетерогенного процесса также важную роль играют форма и размеры реагентов и продуктов реакции, которые определяют объем межфазных зон и их возможное изменение.

Практические применения гетерогенной кинетики процесса взаимодействия минеральных кислот и фосфатной руды многочисленны и разнообразны. Перед использованием любой фосфатной руды для производства удобрения необходимо провести кинетическое исследование, чтобы определить оптимальные параметры. Как упоминалось выше в уравнении (1), обработка или растворение природного фосфата в серной кислоте протекает в две стадии. Из уравнения (3) следует, что превращение фторапатита в монокальцийфосфат является самой медленной (лимитирующей) стадией процесса, и оно определяет скорость всего процесса. При этом достигается

максимальное значение растворимости фторапатита в фосфорной кислоте, потому что межфазное взаимодействие твердое тело-жидкость, которым пренебрегают, блокирует реакцию. Ранее нами были исследованы термодинамические показатели этих стадий [9]. Как показывают проведенные расчеты, вторая стадия больше всего зависит от температуры. Для определения оптимальных рабочих условий, близких к используемым в промышленности, позволяющих исследовать реакцию (3), нами были выбраны такие параметры, как скорость перемешивания (300, 500 и 700 об/мин), концентрация фосфорного ангидрида (25, 30 и 35 % P_2O_5) и температура (60, 70 и 80 °С). Кинетическое исследование растворения фосфатной руды в фосфорной кислоте (3) может быть выведено практически по изменению скорости растворения α в зависимости от времени. Образующийся при реакции (3) монокальцийфосфат является растворимым веществом и переходит в раствор (фильтрат). Его диссоциация происходит по уравнению:



Скорости взаимодействия (3) можно отслеживать по изменению содержания CaO в фильтрате, определяемом методом атомной абсорбции.

Экспериментальная часть

Фосфатная руда поступает из Риватского месторождения и подвергается флотации. Распределение фосфатов по классам крупности в исходной руде и химический состав концентрата после флотации приведены в табл. 1–2.

Таблица 1. Распределение фосфатов по классам крупности

Table 1. Distribution of phosphates by size classes

Класс	Выход		Содержание P_2O_5 , %	Извлечение P_2O_5 , %
	г	%		
+2.5	10	10		
-2.5+1.0	6	6	4.2	3.9
-1.0+0.63	5.5	5.5	5.7	4.8
-0.63+0.40	7.5	7.5	5.7	6.6
-0.40+0.20	38.7	38.7	6.2	37.0
-0.20+0.1	23.4	23.4	8.4	30.3
-0.1+0.063	3.9	3.9	10.6	6.4
-0.063	5	5	6.3	4.8
Исх. руда	100	100	6.5	100

Таблица 2. Химический состав (массовые проценты) пробы фосфатного концентрата, %

Table 2. Chemical composition (mass percent) of a phosphate concentrate sample, %

P_2O_5	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	F	MgO	SO_3	CO_2	SiO_2
26	34,40	1,95	2,15	1,34	1,08	2,92	3,8	18,96



Рис. 1. Схема экспериментальной установки по растворению концентрата в технической фосфорной кислоте

Fig. 1. Scheme of the experimental setup for dissolving the concentrate in commercial phosphoric acid

Сущность работы заключается в воздействии на массу мелко измельченного концентрата ($-0.20+0.1$) с технической фосфорной кислотой. При этом соотношение твердое тело к жидкости составляет 1 к 10. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1.

Устройство состоит из 2-литрового химического стакана, содержащего определенный объем технической фосфорной кислоты. В реакционной среде поддерживается постоянная температура за счет водяной бани и измеряется термометром. После достижения нужной температуры добавляется соответствующая масса концентрата, при этом соблюдая выбранное соотношение твердое / жидкое. Перемешивающее устройство состоит из двух подвижных устройств перемешивания. Одно из которых используется для поддержания однородности суспензии, а второе – для вздувания пены и улучшения контакта воздуха с жидкостью для обеспечения хорошей дегазации и охлаждения смеси. Равномерное перемешивание способствует гомогенности среды. Время проведения процесса растворения составляет 3, 6, 12, 21 и 33 минут. После каждого опыта выполняем фильтрацию с помощью вакуумного насоса. Далее взвешиваем массу фильтрата и путем отбора проб от 1,5 до 2 граммов фильтрата растворяем его в 10 мл соляной кислоты, нагревая на горячей плите при $240\text{ }^{\circ}\text{C}$ до начала кипения для определения содержания кальция методом атомной абсорбции в приборе «Perkin Elmer AA 200». Твердый остаток высушиваем в печи в течение 24 часов при $105\text{ }^{\circ}\text{C}$, а затем взвешиваем.

Степень растворения фторапатита в фосфорной кислоте находим по формуле:

$$\alpha(\%) = \frac{m(\text{CaO})_{\text{дис.}}}{m(\text{CaO})_{\text{фос.}}} \times 100 = \frac{m_f \times \%(\text{CaO})_{(t)} - m_{\text{Ai}} \times \%(\text{CaO})_{(t=0)}}{m_p \times \%(\text{CaO})_{\text{фос.}}} \times 100 = f(t)$$

где $\alpha(\%)$ – степень растворения; $m(\text{CaO})_{\text{дис.}}$ – масса CaO , растворившегося в жидкой фазе; $m(\text{CaO})_{\text{фос.}}$ – масса CaO , содержащегося в концентрате; m_f – масса фильтрата; $\%(\text{CaO})_{(t)}$ – содержание CaO в жидкой фазе в момент времени t ; m_{Ai} – масса исходной жидкой фазы; $\%(\text{CaO})_{(t=0)}$ –

α_0 – содержание CaO в жидкой фазе в момент времени ($t = 0$); m_p – масса концентрата; % (CaO)
 $\alpha_{\text{фос.}}$ – содержание CaO в концентрате.

Результаты и их обсуждение

Влияние скорости перемешивания

Механическое перемешивание – средство для создания и ускорения массо- и теплообмена в пределах одной и той же фазы или между различными присутствующими фазами. Одна из трудностей реализации этих методов заключается в том, что часто их не учитывают при проектировании и эксплуатации в производстве, так как мало влияют на процесс. Однако нами было исследовано влияние этого параметра на кинетику растворения фосфатного концентрата.

Результаты исследования зависимости степени растворения от времени и скорости перемешивания (а), а также их линейризации (б) проиллюстрированы на рис. 2.

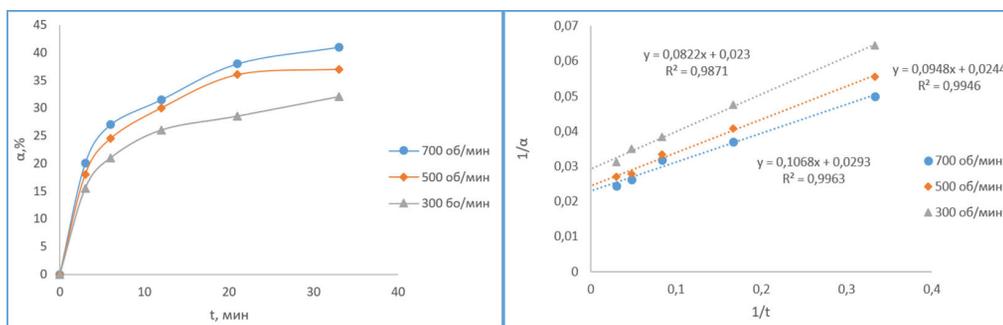


Рис. 2. Зависимости степени растворения от времени и скорости перемешивания в прямых (а) и обратных координатах (б)

Fig. 2. Dependence of the degree of dissolution on the mixing time and speed in direct (a) and inverse coordinates (b)

Как видно из кривых (а), при увеличении скорости перемешивания увеличивается скорость растворения фосфатного концентрата. При этом максимальная скорость растворения наблюдается до трех минут. Из линейризованных зависимостей (б) определили максимальное значение степени растворения при исследуемых условиях. Максимальное значение составляет 34,13, 40,98 и 43,48 % для 300, 500 и 700 об/мин, соответственно.

Влияние концентрации фосфорной кислоты

Нами было исследовано растворение фосфатного концентрата в зависимости от концентрации фосфорной кислоты при скорости перемешивания 300 об/мин и температуре 60 °С. Полученные результаты в прямых ($\alpha=f(t)$) и обратных ($1/\alpha=f(1/t)$) координатах представлены на рис. 3.

Как видно из зависимостей (а), при увеличении концентрации фосфорной кислоты (фосфатного ангидрида) увеличивается степень растворения концентрата. При повышении концентрации фосфатной кислоты от 25 до 35 % в течение 33 минут степень разложения концентрата увеличивается в 1,3 раза. Уравнения зависимостей в обратных координатах (б) показывают,

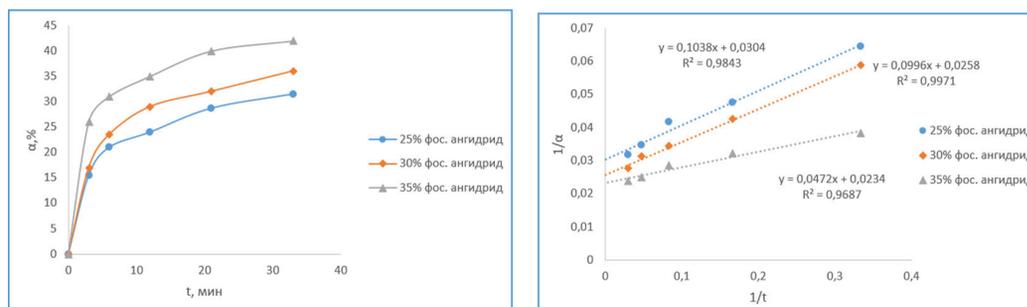


Рис. 3. Зависимости степени растворения от времени и концентрации фосфорной кислоты в прямых (а) и обратных координатах (б)

Fig. 3. Dependence of the degree of dissolution on the time and concentration of phosphoric acid in direct (a) and inverse coordinates (b)

что кривые выходят на плато при степени растворения 32,89, 38,76 и 42,74 %, соответствующей содержанию фосфатного ангидрида 25, 30 и 35 %.

Влияние температуры

Также нами было исследовано растворение концентрата в зависимости от времени и температуры. Полученные результаты по растворению в зависимости от времени и температуры в прямых ($\alpha=f(t)$) и обратных ($1/\alpha=f(1/t)$) координатах проиллюстрированы на рис. 4.

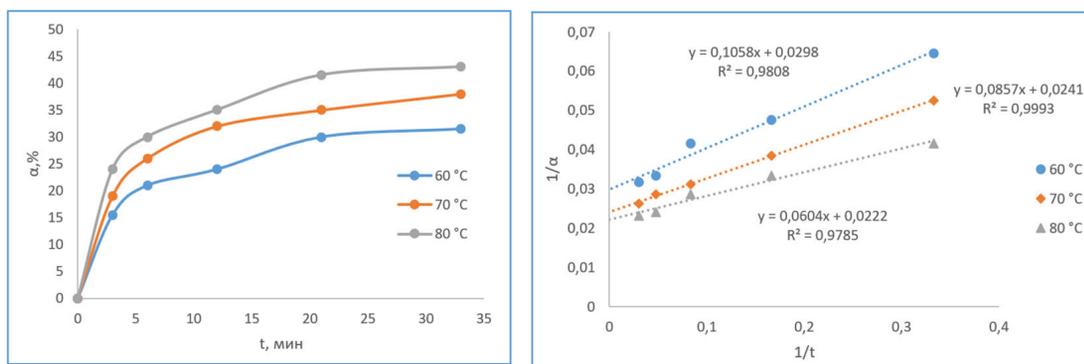


Рис. 4. Зависимости степени растворения от времени и температуры в прямых (а) и обратных координатах (б)

Fig. 4. Dependences of the degree of dissolution on time and temperature in direct (a) and inverse coordinates (b)

Как видно из рисунка (а), повышение температуры благоприятно влияет на скорость растворения фосфатного концентрата. Скорость разложения максимальна в первые три минуты, а затем постепенно уменьшается. Из графика зависимостей в обратных координатах (б) видно, что зависимости хорошо коррелируются ($R^2 > 0,97$). Максимальное значение степени растворения при исследуемых значениях температуры 60, 70 и 80 °C составляет 33,56, 41,49 и 45,05 % соответственно.

Выбор математической модели

Изучения гетерогенных процессов в системе жидкость-твердое тело до сих пор остаются актуальными и их эффективное практическое применение является одной из основных задач современной химической технологии. Растворение фосфорита в минеральных кислотах относится к таким процессам и из-за сложности растворения остается малоизученным. Тем не менее существует несколько различных опубликованных материалов по кинетической модели, дающих разные выражения скорости в зависимости от времени [9–11].

Чтобы лучше представить скорость разложения как функцию от времени, подходящей математической моделью для представления растворения является модель сжимающегося ядра [12–20] с интегрированным выражением,

$$1-(1-X)^{1/3}=k \cdot t,$$

где X – доля прореагировавшего, k – кинетическая постоянная и время t . Эта зависимость графически представлена на рис. 5. Принцип этой модели – зерно фосфата начального размера и его площадь поверхности раздела зависит только от X . Различные кривые $X = f(t)$ могут быть выведены из одной в другую, изменяя переменную от t до $k \cdot t$ [12]. Расчет становится простым. Предположим, что имеем дело со сферами начального радиуса r_0 , радиус в момент времени t равен $r = r_0 - k \cdot t$, это также скорость, с которой уменьшается размер зерна.

Если введем коэффициент конверсии, то получим: $1 - X = m/m_0 = (r/r_0)^3$, если m_0 и m – массы сфер при $t = 0$ и t

$$1 - X = (1 - k \cdot t / r_0)^3.$$

Очень легко можем проверить следующую формулу: $1 - (1 - X)^{1/3} = k \cdot t / r_0$.

Скорость реакции будет записана в следующем виде:

$$dX/dt = (3k/r_0) (1 - X)^{2/3}.$$

Этот закон скорости подобен гомогенной реакции порядка $2/3$ [15].

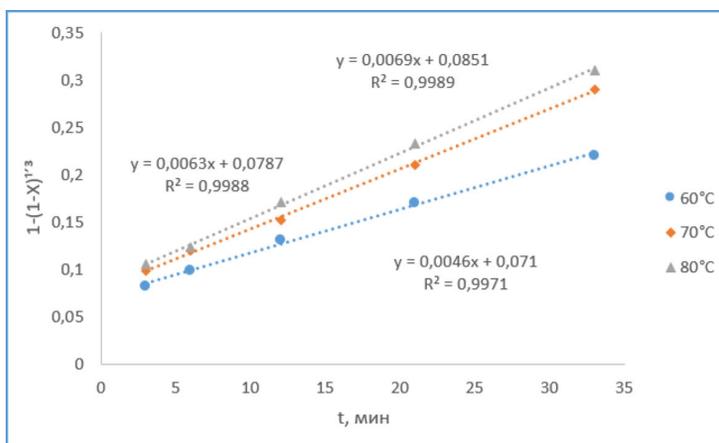


Рис. 5. Определение констант скорости

Fig. 5. Determination of rate constants

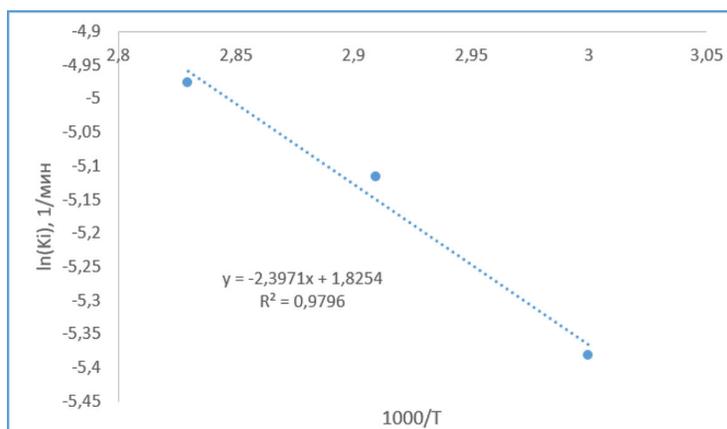


Рис. 6. Зависимость логарифма кинетической постоянной от обратной температуры

Fig. 6. Dependence of the logarithm of the kinetic constant on the inverse temperature

Параметры, выбранные для определения константы скорости и энергии активации: скорость перемешивания = 300 об/мин, 25 % P_2O_5 и температура = 60, 70 и 80 °С.

Константы скорости k определяем из кривых, дающих $1-(1-X)^{1/3}$, как функцию времени, которая должна быть линейной; наклон линий дает константы скорости для каждой температуры. Чтобы определить энергию активации E_a растворения фосфатного концентрата, строим график зависимости $\ln(k_i)$ от температуры в обратных координатах ($1000/T$). Полученные результаты показаны на рис. 6.

Как видно из рис. 5, крутизна линии k/T_0 для каждой температуры отличается и с увеличением температуры – увеличивается. Отметим, что прямые не проходят через начало координат, поскольку равновесие достигается быстро. Оно может происходить из-за появления другой фазы в присутствии любого изменения форм-фактора в начале разложения.

Большинство химических реакций подчиняются уравнению Аррениуса [12–14]. Оно использовалось для определения влияния температуры на растворение концентрата:

$$k = k_0 e^{-\frac{E_a}{RT}},$$

где E_a – энергия активации, k_0 – предэкспоненциальный множитель с теми же единицами, что и кинетическая постоянная k , R – универсальная газовая постоянная (8,314 кал. K^{-1} моль $^{-1}$), а T – абсолютная температура (К). Тогда логарифм кинетической постоянной является линейной функцией обратной температуры. Полученная зависимость представлена на рис. 6.

Энергия активации растворения концентрата, рассчитанная по наклону прямой линии графика Аррениуса (рис. 6), составляет 19,928 кДж / моль. Уравнение Аррениуса можно записать в виде: $k = 6,2e^{-\frac{19928}{RT}}$.

Низкое значение энергии активации, равное 19,928 кДж / моль (4,7597 ккал · моль), дает нам важное представление о кинетически сложной модели. Исследование механизма растворения фосфатного концентрата в фосфатной кислоте показывает, что, вероятно, данный процесс ограничивается диффузией ионов Ca^{2+} [18–21].

Выводы

Установлено, что скорость растворения фосфатов увеличивается за счет увеличения всех исследуемых параметров: температуры в диапазоне (60–80 °С), скорости перемешивания в диапазоне (300–700 об/мин) и концентрации фосфорной кислоты в диапазоне (25–35 % P₂O₅) и скорость растворения максимальна в течение первых 3 минут.

Определено максимальное значение степени растворения в зависимости от скорости перемешивания и составляет 34,13, 40,98 и 43,48 % для 300, 500 и 700 об/мин соответственно.

Выяснено, что при изменении концентрации фосфатной кислоты в системе жидкость–твердое тело кривые выходят на плато при степени растворения 32,89, 38,76 и 42,74 %, соответствующей содержанию фосфатного ангидрида 25, 30 и 35 %.

Исследовано влияние температуры на степень растворения. Установлено, что температура благоприятно влияет на скорость растворения фосфатного концентрата и максимальное значение степени растворения при исследуемых значениях температуры 60, 70 и 80 °С составляет 33,56, 41,49 и 45,05 % соответственно.

Моделирован процесс растворения концентрата с помощью математической модели сжимающегося ядра. Определены кинетические параметры, влияющие на растворение, а именно кинетическая константа k и энергия активации E_a , которая равна 19,928 кДж / моль.

Список литературы / References

1. Тошов Ф. М., Самихов Ш. Р., Алифшоева С. А., Курбонов Ш. А., Исмоилова М. С., Сафаров С. Ш. Кислотное разложение природных фосфоритов с получением фосфорных удобрений. *Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования*. 2019, 3(47), 91–95. [Toshov F. M., Samikhov Sh. R., Alifshoeva S. A., Kurbonov Sh. A., Ismoilova M. S., Safarov S. Sh. Acid decomposition of natural phosphorites to obtain phosphate fertilizers. *Polytechnic Bulletin. Series: Engineering research*, 2019, 3(47), 91–95 (In Rus.)]
2. Курбонов Ш. А., Ходжахон М. И., Кабгов Х., Мухидинов З. К., Абулхаев В. Д., Самихов Ш. Р., Рахими Ф. Минералогический состав фосфоритных руд месторождений Риват и Каратаг. *ДАН Республики Таджикистан*, 2017, 60, 7–8, 349–355. [Kurbanov Sh. A., Khodzhakhon M. I., Kabgov H., Muhidinov Z. K., Abulhaev V. D., Samikhov Sh. R., Rahimi F. Minerology composition of phosphate of the Rivat and Karatag ores. Proceeding NANT, Department of Physics and Mathematics, chem., geol. and tech. sciences, 2017, 60, 7–8, 349–355 (In Rus.)]
3. Dorozhkin S. V. Calcium orthophosphate (CaPO₄)-based bone-graft substitutes and the special roles of octacalcium phosphate materials. *Octacalcium Phosphate Biomaterials: Understanding of Bioactive Properties and Application*, 2019, 213–288.
4. Van der Sluis S., Meszaros Y., Marchee W. G. J., Wesselingh H. A., Van Rosmalen G. M. The digestion of phosphate ore in phosphoric acid, 1987, 85–89.
5. Ескендинова М. М., Ескендинов М. З., Жолдасбеков К. С. Азотно-сернокислотное разложение низкосортных фосфоритов Каратау. *Научные труды ЮКГУ им. М. Ауэзова*, 2019, 3(51), 22–27. [Eskendirova M. M., Eskendirov M. Z., Zholdasbekov K. S. Nitrogen-sulfuric acid decomposition of low-grade phosphorites of Karatau. *Scientific works of Auezov South Kazakhstan State University*, 2019, 3(51), 22–27 (In Rus.)]

6. Dorozhkin S. V. The dissolution mechanism of calcium apatites in acids. *Apatite: Synthesis, Structural Characterization and Biomedical Applications*, 2014, 141–172.

7. Плужникова Е. Д., Якубова Р. Р., Ескендинова М. М. Исследование сернокислотного разложения фосфорита месторождения Жанатас. *Вестник науки Южного Казахстана*, 2020, 2(10), 134–138. [Pluzhnikova E. D., Yakubova R. R., Eskendirova M. M. Study of sulfuric acid decomposition of phosphorite from the Zhanatas deposit. *Bulletin of Science of South Kazakhstan*, 2020, 2(10), 134–138 (In Rus.)]

8. Рассохина Л. Ю., Белова Н. П., Леонов В. Т., Хватова Е. В., Шаповал В. В. Переработка низкосортных фосфоритов на комплексные минеральные удобрения. *Вестник Казанского технологического университета*, 2006, 3, 85–91 [Rassokhina L. Yu., Belova N. P., Leonov V. T., Khvatova E. V., Shapoval V. V. Processing of low-grade phosphorites into complex mineral fertilizers. *Bulletin of Kazan Technological University*, 2006, 3, 85–91 (In Rus.)]

9. Курбонов Ш. А., Обидов Б. А., Самихов Ш. Р., Холов Х. И. Расчет значений термодинамических функций процесса сернокислотного разложения фосфоритного концентрата месторождения Риват Таджикистана. *Вестник Тверского государственного университета. Серия: Химия*, 2021, 2(44), 37–44. [Kurbonov Sh. A., Obidov B. A., Samikhov Sh. R., Kholov Kh. I. Calculation of the values of thermodynamic functions of the sulfuric acid decomposition of the phosphorite concentrate of the Rivat deposit of Tajikistan. *Bulletin of Tver State University. Series: Chemistry*, 2021, 2(44), 37–44 (In Rus.)]

10. Окрушко Е. Ю., Почиталкина И. А., Петропавловский И. А. Кинетика азотнофосфорнокислотного разложения Полпинского фосфорита. *Успехи в химии и химической технологии*, 2014, 28, 5(154), 133–135. [Okrushko E. Yu., Pochitalkina I. A., Petropavlovsky I. A. Kinetics of nitrogen-phosphoric acid decomposition of Polpinsky phosphorite. *Advances in Chemistry and Chemical Technology*, 2014, 28, 5(154), 133–135 (In Rus.)]

11. Dorozhkin S. V. Calcium phosphates. *Handbook of Bioceramics and Biocomposites*, 2016, 91–118.

12. Avrami M. Kinetics of Phase Change. *Chemistry Physics*, 1939, 7, 1103–1108.

13. Gharabaghi M., Irannajad M., Noaparast M. A review of the beneficiation of calcareous phosphate ores using organic acid leaching. *Hydrometallurgy*, 2010, 103, 96–107.

14. Ёрбобоев Р. Ч., Мирзакулов Х. Ч., Меликулова Г. Э. Кинетика разложения фосфоритов Центральных Кызылкумов азотной кислотой. *Химическая технология и техника*, 2020, 87–88. [Yorboboev R. Ch., Mirzakulov Kh. Ch., Melikulova G. E. Kinetics of decomposition of phosphorites of the Central Kyzylkum by nitric acid. *Chemical technology and technique*, 2020, 87–88 (In Rus.)]

15. Abali Y., Colak S., Yartasi A. Dissolution Kinetics of Phosphate Rock with Cl₂ Gas in Water, *Hydrometallurgy*, 1997, 46, 13–25.

16. Dorozhkin S. V. A Review on the Dissolution Models of Calcium Apatites, *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 2002, 45–61.

17. Артёменко В. Г. Влияние концентрации кислоты на процесс сернокислотного разложения фосфоритов Кинешемского месторождения. *Вестник Костромского государственного университета им. Н. А. Некрасова*, 2014, 20, 6, 28–31. [Artyomenko V. G. Influence of acid concentration on the process of sulfuric acid decomposition of phosphorites of the Kineshma deposit. *Bulletin of Nekrasov Kostroma State University*, 2014, 20, 6, 28–31 (In Rus.)]

18. Холов Х. И., Шарифбоев Н. Т., Зарифова М. С., Самихов Ш. Р., Ганиев И. Н. Кинетика процесса тиосульфатно-аммиачного выщелачивания золота из отобранной руды месторождения «Истиклол» (Тутли). *Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: естественные и технические науки*, 2021, 1, 95–98. [Kholov Kh.I., Sharifboev N.T., Zarifova M.S., Samikhov Sh.R., Ganiev I.N. Kinetics of the process of thiosulphate-ammonia leaching gold from the selected ore of the Istiklole (Tutli) deposit. *Bulletin of St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 1. Natural and technical science*, 2021, 1, 95–98 (In Rus.)]

19. Haug H.H. Unit Processes in Extractive Metallurgy. Montana College of Mineral Science and Technology. *National Science Foundation, USA. Modul 2*, 1989, 35–38.

20. Холов Х. И., Квятковская Л. В., Самихов Ш. Р. Кинетика процесса ацетилтиомочевинного выщелачивания золота из хвостов флотации нижнего горизонта Джижикрутского месторождения. *Евразийский союз ученых*, 2019, 4(61), 59–65. [Kholov Kh.I., Kvyatkovskaya L. V., Samikhov Sh. R. Kinetics of the process of acetylthiourea leaching of gold from the flotation tailings of the lower horizon of the Dzhizhikrut deposit. *Eurasian Union of Scientists*, 2019, 4(61), 59–65 (In Rus.)]

21. Waggaman W.H. Phosphoric acid, phosphates and phosphatic fertilizers. *Second Edition, Second Printing*, 1953, 5, 183–187.