

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 544.2:544.3:544.4

doi: 10.17308/sorpchrom.2025.25/13048

Гидролиз пиродифосфорной кислоты в процессе ее ионообменного получения

**Ольга Тихоновна Гавлина, Екатерина Анатольевна Карпюк,
Владимир Александрович Иванов[✉], Татьяна Викторовна Сафронова**

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия,
minilana@mail.ru[✉]

Аннотация. Пиродифосфорную кислоту применяют в разных областях: в качестве ингибитора коррозии металлов, как буферный агент в растворе электролита в технологии гальванопокрытия, при получении пиродифосфата ванадила, который является селективным катализатором при окислении *n*-бутана до малеинового ангидрида. Внимание к пиродифосфорной кислоте вызвано также разработкой резорбируемых неорганических фосфатных материалов для регенеративного лечения дефектов костных тканей.

Получить пиродифосфорную кислоту можно в результате реакции фосфорной кислоты с оксихлоридом фосфора. Но наиболее простым способом получения пиродифосфорной кислоты в водном растворе считают катионный обмен из пиродифосфата натрия на сильнокислотных катионообменниках полистирольного типа. Такие процессы проводят как в колонках с катионитом, так и в статических условиях простым перемешиванием избытка катионита в водородной форме с соответствующей солью.

В настоящей работе изучено получение пиродифосфорной кислоты из пиродифосфата натрия в колонках с сильнокислотным катионитом при температурах 25 и 60°C с акцентом на то, в какой степени пиродифосфорная кислота успевает превратиться в ортофосфорную за время нахождения в ионообменной колонке и как быстро гидролиз продолжается в полученном фильтрате. Показано, что в фильтрате сразу после его отбора из колонки помимо пиродифосфорной кислоты содержится некоторое количество ортофосфорной кислоты (6% от общего содержания фосфора представлено в виде ортофосфорной кислоты при 25°C и 13% при 60°C). При последующем хранении фильтрата при 25°C гидролиз пиродифосфорной кислоты продолжается, однако сравнительно медленно. Спустя 3 часа после получения раствора пиродифосфорной кислоты степень ее превращения в ортофосфорную увеличивается относительно мало, а полный гидролиз пиродифосфорной кислоты не происходит даже спустя 19-21 суток. Анализ зависимости степени гидролиза пиродифосфорной кислоты от времени показал, что процесс происходит по кинетическому уравнению реакции первого порядка.

Ключевые слова: ионный обмен, сульфокислотный катионит, пиродифосфорная кислота, пиродифосфат натрия, ортофосфорная кислота, кинетика гидролиза пиродифосфорной кислоты.

Благодарности: работа выполнена в рамках госзадания (тема № 121031300090-2).

Для цитирования: Гавлина О.Т., Карпюк Е.А., Иванов В.А., Сафронова Т.В. Гидролиз пиродифосфорной кислоты в процессе ее ионообменного получения // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2025. Т. 25, № 3. С. 389-398. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2025.25/13048>

Original article

Hydrolysis of pyrophosphoric acid in the process of its ion exchange production

Olga T. Gavlina, Ekaterina A. Karpyuk, Vladimir A. Ivanov[✉], Tatyana V. Safronova
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation, minilana@mail.ru[✉]

Abstract. Pyrophosphoric acid is used in various fields: as a metal corrosion inhibitor, as a buffer agent in an electrolyte solution in electroplating technology, in the production of vanadyl pyrophosphate, which is a selective catalyst in the oxidation of *n*-butane to maleic anhydride. Attention to pyrophosphoric acid is also due to

the development of resorbable inorganic phosphate materials for the regenerative treatment of bone tissue defects. Pyrophosphoric acid can be obtained as a result of the reaction of phosphoric acid with phosphorus oxychloride. But the simplest way to obtain pyrophosphoric acid in an aqueous solution is considered to be cation exchange from sodium pyrophosphate on strongly acidic polystyrene cation exchangers. Such processes are carried out both in columns with cation exchanger and under static conditions by simply mixing excess cation exchanger in hydrogen form with the corresponding salt. In this work, we study the production of pyrophosphoric acid from sodium pyrophosphate in columns with a strongly acidic cation exchanger at temperatures of 25 and 60 °C with an emphasis on the extent to which pyrophosphoric acid manages to transform into orthophosphoric acid during its stay in the ion-exchange column and how quickly hydrolysis continues in the resulting filtrate. It is shown that the filtrate immediately after its collection from the column contains, in addition to pyrophosphoric acid, a certain amount of orthophosphoric acid (6% of the total phosphorus content is presented as orthophosphoric acid at 25 °C and 13% at 60 °C). During subsequent storage of the filtrate at 25 °C, the hydrolysis of pyrophosphoric acid continues, but relatively slowly. Three hours after obtaining the pyrophosphoric acid solution, the degree of its conversion into orthophosphoric acid increases relatively little, and complete hydrolysis of pyrophosphoric acid does not occur even after 19-21 days. Analysis of the dependence of the degree of hydrolysis of pyrophosphoric acid on time showed that the process occurs according to the kinetic equation of a first-order reaction.

Keywords: ion exchange, sulfonic ion exchange resin, pyrophosphoric acid, sodium pyrophosphate, orthophosphoric acid, kinetics of pyrophosphoric acid hydrolysis.

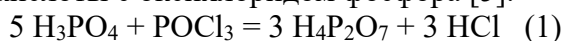
Acknowledgments: the work was carried out within the framework of the state task (topic No. 121031300090-2).

For citation: Gavlina O.T., Karpyuk E.A., Ivanov V.A., Safronova T.V. Hydrolysis of pyrophosphoric acid in the process of its ion exchange production. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2025. 25(3): 389-398. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2025.25/13048>

Введение

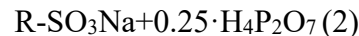
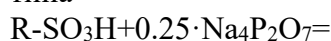
Пирофосфорная кислота, а также ее соли и другие соединения, используют в разных областях [1, 2]. Кислота используется в качестве ингибитора коррозии металлов, особенно железа и стали, в технологии гальванопокрытия как буферный агент в растворе электролита, в пищевой промышленности одобрена в качестве разрыхлителя и регулятора pH. Также она используется при получении пирофосфата ванадила $(VO)_2P_2O_7$, который является селективным катализатором при окислении н-бутана до малеинового ангидрида. Сама пирофосфорная кислота является катализатором в реакциях этерификации, например, при производстве красок, покрытий и клеев. Внимание к пирофосфорной кислоте вызвано также разработкой резорбируемых неорганических фосфатных материалов для регенеративного лечения дефектов костных тканей [3, 4].

Получить пирофосфорную кислоту можно в результате реакции фосфорной кислоты с оксихлоридом фосфора [5].



Но наиболее простым способом получения пирофосфорной кислоты в водном

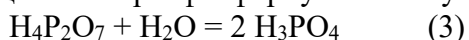
растворе считают катионный обмен из пирофосфата натрия на сильнокислотных катионообменниках полистирольного типа



(здесь R – полистирол-дивинилбензольный каркас материала, к которому пришиты сульфокислотные группы) и из кислого пирофосфата натрия [6-9]. Такие процессы проводят как в колонках с катионитом, так и в статических условиях простым перемешиванием избытка катионита в водородной форме с соответствующей солью. Возможности проведения процесса не только в динамических условиях, но и в статических условиях способствует то, что в пирофосфорной кислоте даже первые две кислотные группы (степени диссоциации) характеризуются относительно невысокими константами диссоциации, а две другие – являются слабокислотными. Поэтому пирофосфат-анион в растворе селективно связывает катионы H^+ из ионообменника. Такой путь получения пирофосфорной кислоты оказался востребованным в последнее время при получении материалов для получения биоразлагаемых фаз костных имплантов [9, 10]. Причем в работе [9]

синтез осуществляли в статических условиях, а уже в работе [10] – в колонке с катионитом, что обеспечивало полное замещение ионов натрия в пирофосфате на ионы водорода.

Известно [11-14], что в водных растворах пирофосфорная кислота постепенно превращается в ортофосфорную кислоту



В работе [14] утверждается, что гидролиз недиссоциированной пирофосфорной кислоты в воде катализируется сильными кислотами, т.к. оказалось, что зависимости константы скорости первого порядка от концентрации кислоты очень похожи для соляной, хлорной и серной кислот.

В литературе [8, 15] отмечают, что для снижения роли гидролиза при ионообменном способе получения пирофосфорной кислоты процесс лучше проводить при температуре ниже 10°C. С другой стороны, с повышением температуры очень резко повышается растворимость пирофосфата натрия и, следовательно, повышая температуру при ионообменном получении кислоты, можно получать более концентрированный ее раствор [16]. Поэтому роль гидролиза пирофосфорной кислоты в ортофосфорную при ионообменном синтезе требует более внимательного изучения.

В настоящей работе изучено получение пирофосфорной кислоты в колонках с сильнокислотным катионитом с акцентом на то, в какой степени пирофосфорная кислота успевает превратиться в ортофосфорную за время нахождения в ионообменной колонке и как быстро она превращается в полученном фильтрате.

Экспериментальная часть

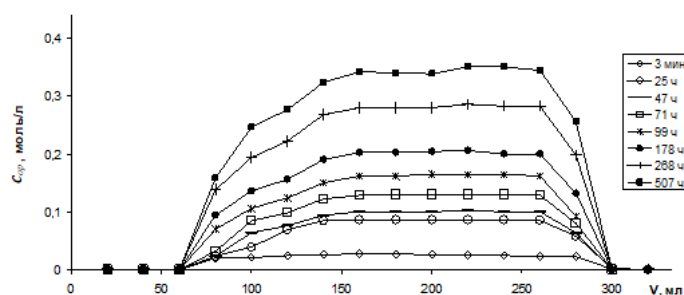
Использовали промышленный сульфокислотный катионит полистирольного типа с 8% дивинилбензола КУ-2х8. Процесс получения пирофосфорной кислоты из пирофосфата натрия проводили в стеклянной термостатируемой колонке с внутренним диаметром 1.2 см при двух температурах: 60°C в

одном опыте и 25°C в другом. Колонку заполняли ионообменником КУ-2х8, ионит переводили в Н-форму избытком соляной кислоты и промывали водой (высота слоя ионита 95 см). Раствор пирофосфата натрия определенной концентрации, имеющий ту же температуру, что и ионообменник в колонне, пропускали через колонку сверху вниз со скоростью 2 см³/мин. Концентрации пирофосфата натрия в двух опытах различались, т.к. учитывалось, что его растворимость сильно зависит от температуры [16]. На выходе из колонки собирали порции раствора, которые далее хранили при комнатной температуре 25°C. В каждой порции спустя определенные промежутки времени после отбора определяли концентрацию ортофосфорной кислоты и в конце (через 20 суток) определили общую концентрацию фосфора. Концентрацию пирофосфорной кислоты оценивали, вычитая из общей концентрации фосфора концентрацию ортофосфорной кислоты с учетом стехиометрических коэффициентов.

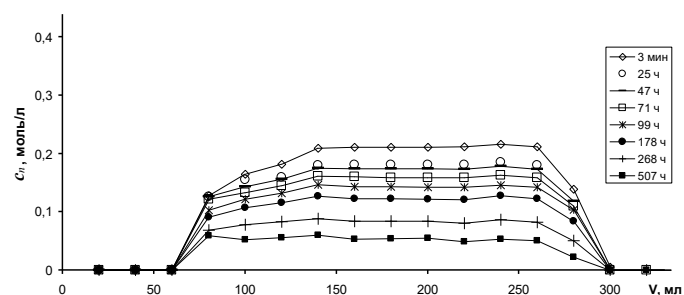
Содержание PO_4^{3-} определяли фотометрическим методом по желтому фосфорванадиевомолибденовому комплексу. Для этого определенную порцию анализируемого раствора смешивали с 25 мл раствора, содержащего молибдат и ванадат аммония в слабокислой среде и разбавляли водой до 100 см³. Полученный желтый фосфорнованадиевомолибденовый комплекс $\text{P}_2\text{O}_5\text{-V}_2\text{O}_5\text{-22 MoO}_3$ фотометрировали при фиксированной длине волны 440 нм и содержание орто-форм фосфора определяли по градуировочному графику [17].

Общее содержание фосфора определяли аналогично, но для перевода пирформ фосфора в орто-формы пробы подвергали кипячению с соляной кислотой в течение 15-20 минут. Ошибка метода не превышала 0.4%.

Чтобы оценить возможное влияние каталитических свойств ионита на гидролиз



а



б

Рис. 1. Изменение концентрации ортофосфорной кислоты (а) и пиропосфорной кислоты (б) в пробах, отобранных из ионообменной колонки в процессе получения пиропосфорной кислоты при 25°C, спустя различные промежутки времени при хранении при 25°C.

Fig. 1. Change in the concentration of orthophosphoric acid (a) and pyrophosphoric acid (б) in samples taken from an ion exchange column during the production of pyrophosphoric acid at 25°C, after various time intervals during storage at 25°C.

пиропосфорной кислоты, одну из фракций выходящего из колонки раствора в опыте при 25°C оставили в контакте с небольшим количеством водородной формы катионита в течение всего времени исследования и также, как и для других проб анализировали изменение состава раствора во времени.

Обсуждение результатов

На рис. 1 и 2 представлены концентрации ортофосфорной и пиропосфорной кислот в пробах, отобранных из ионообменной колонки в процессах получения пиропосфорной кислоты при 25 и при 60°C спустя различные промежутки времени после их отбора. Первые пробы, в которых отсутствует кислота, отвечают вытеснению воды из «свободного» объема колонки. Горизонтальные участки отвечают пробам, в которых достигается максимальная концентрация кислоты и

при этом отсутствует пиропосфат натрия. Эти зависимости показывают, что в пробах, отобранных из ионообменной колонки, помимо пиропосфорной кислоты содержится некоторое количество ортофосфорной кислоты.

На рис. 3 и 4 для каждого из опытов при двух температурах приведены зависимости концентрации ортофосфорной кислоты в одной из проб от времени. Экстраполяция этих зависимостей к 0-ому времени (рис. 3 б и 4 б) показала, что сразу после выхода из колонки ~ 6 % (в процессе при 25°C) и ~ 13 % (в процессе при 60°C) пиропосфорной кислоты успевает гидролизаться до ортофосфорной кислоты.

При последующем хранении фильтрата при 25°C продолжает протекать гидролиз пиропосфорной кислоты, однако сравнительно медленно. Спустя 3

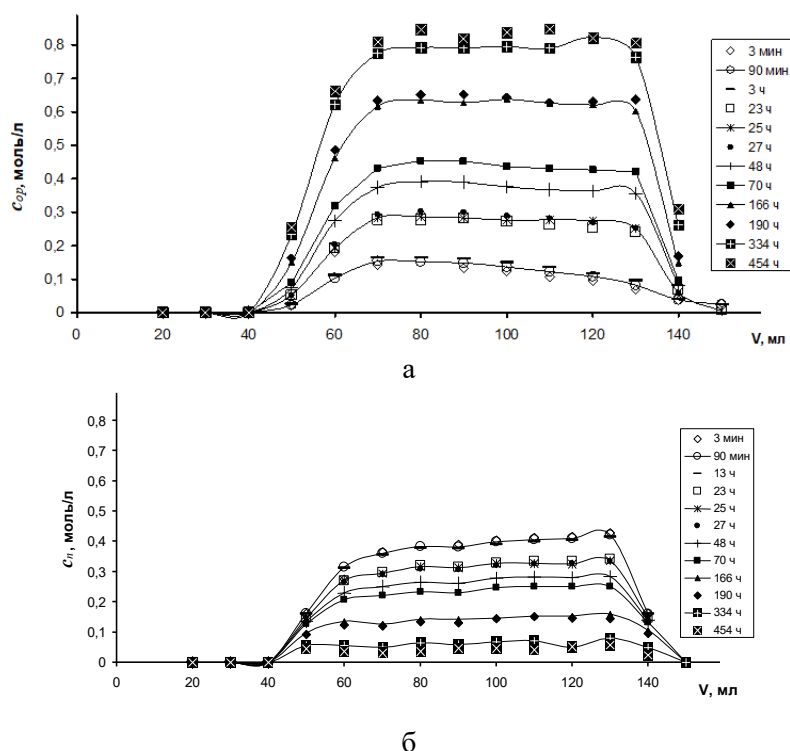


Рис. 2. Изменение концентрации ортофосфорной кислоты (а) и пиродифосфорной кислоты (б) в пробах, отобранных из ионообменной колонки в процессе получения пиродифосфорной кислоты при 60°C, спустя различные промежутки времени спустя различные промежутки времени при хранении при 25°C.

Fig. 2. The change in the concentration of orthophosphoric acid (a) and pyrophosphoric acid (b) in samples taken from an ion exchange column during the production of pyrophosphoric acid at 60°C, after different periods of time after different periods of time during storage at 25°C.

часа степень превращения пиродифосфорной кислоты в ортофосфорную увеличивается незначительно, а полный гидролиз пиродифосфорной кислоты не происходит даже спустя 19-21 суток.

Эти данные позволяют оценить кинетические характеристики процесса гидролиза пиродифосфорной кислоты. Примем во внимание, что в отобранных из ионообменной колонки пробах более надежно измеряется концентрация ортофосфорной кислоты. Обозначим: c_n^o и c_{op}^o – исходные концентрации пиродифосфорной и ортофосфорной кислот в пробе непосредственно после ее выхода из ионообменной колонки, c_n и c_{op} – текущие концентрации пиродифосфорной кислоты в отобранной пробе, c_{op}^∞ – предельная возможная концентрация ортофосфорной кислоты в результате полного гидролиза

пиродифосфорной кислоты (все концентрации мольные, моль/дм³), t – время.

В соответствии со стехиометрией реакции концентрация пиродифосфорной кислоты

$$c_n = c_n^o - 0.5 \cdot (c_{op} - c_{op}^o) \quad (4)$$

Предположим, что реакция гидролиза пиродифосфорной кислоты в условиях избытка воды описывается кинетическим уравнением первого порядка

$$-\frac{dc_n}{dt} = k_1 c_n \quad (5)$$

В соответствии с балансовым уравнением (4)

$$-\frac{d(c_n^o + 0.5 \cdot c_{op}^o - 0.5 \cdot c_{op})}{dt} = k_1 (c_n^o + 0.5 \cdot c_{op}^o - 0.5 \cdot c_{op}) \quad (6)$$

Разделяем переменные и интегрируем это уравнение, используя в качестве начального условия

$$(c_n^o + 0.5 \cdot c_{op}^o - 0.5 \cdot c_{op}) = c_n^o \text{ при } t = 0 \quad (7)$$

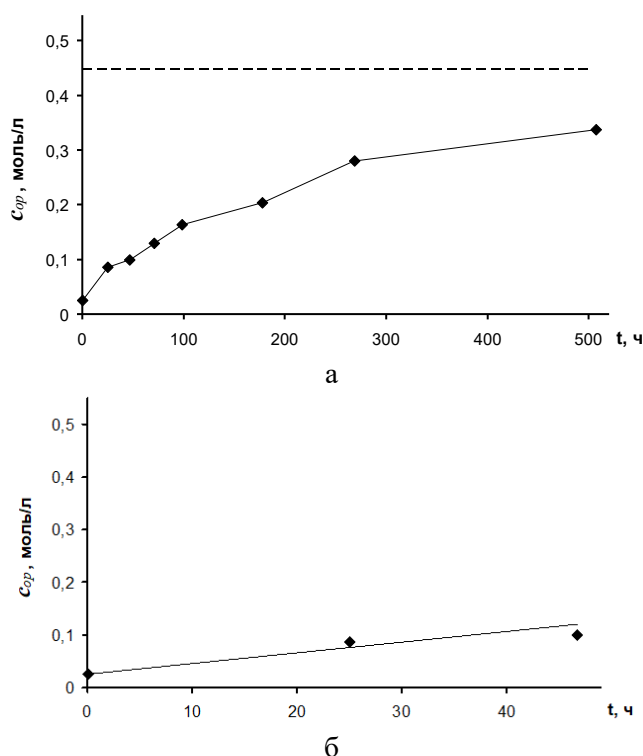


Рис. 3. Зависимости концентрации ортофосфорной кислоты в пробе, соответствующей 200 мл на выходной кривой опыта при 25°C от времени (а), начальный участок этой зависимости (б). Пунктиром показаны предельные концентрации ортофосфорной кислоты после полного гидролиза.

Fig. 3. The dependence of the concentration of orthophosphoric acid in a sample corresponding to 200 ml on the output curve of the experiment at 25°C on time (a), the initial section of this dependence (б). The dotted line shows the maximum concentrations of orthophosphoric acid after complete hydrolysis.

В результате получаем

$$\ln \frac{c_n^o}{(c_n^o + 0.5 \cdot c_{op}^o - 0.5 \cdot c_{op})} = k_1 t \quad (8)$$

Таким образом, свидетельством первого порядка реакции превращения пирофосфорной кислоты в ортофосфорную является линейность зависимости $\ln c_n = \ln(c_n^o + 0.5 \cdot c_{op}^o - 0.5 \cdot c_{op})$ от времени ($\ln(0.127 - 0.5c_{op})$ и $\ln(0.466 - 0.5c_{op})$ от t для проб, полученных в ионообменном процессе при 25 и 60°C, соответственно).

Экстраполяцией начальных частей кинетических кривых на рис. 3 б и рис. 4 б нашли значения c_{op}^o , равные 0.030 моль/дм³ в опыте при 25°C и 0.13 моль/дм³ в опыте при 60°C. Общее содержание фосфора в пересчете на ортофосфорную кислоту c_{op}^{∞}

составили 0.45 моль/дм³ в первом опыте и 0.93 моль/дм³ во втором опыте.

На рис. 5. и рис. 6 представлены экспериментальные зависимости $\ln(c_n^o + 0.5c_{op}^o - 0.5c_{op})$ от t , рассчитанные для кинетических кривых на рис. 3 и 4.

Хотя по расположению экспериментальных точек на данных графиках можно заметить нелинейность, тем не менее, их отклонения от линейных аппроксимаций находятся в пределах погрешности измерения концентраций. Анализ наклона данных зависимостей дал следующие значения эффективных констант скорости $k_1 = 4.3 \cdot 10^{-5}$ мин⁻¹ для проб, полученных в ионообменном процессе при 25°C и $k_1 = 8.3 \cdot 10^{-5}$ мин⁻¹ для проб, полученных в ионообменном процессе при 60°C.

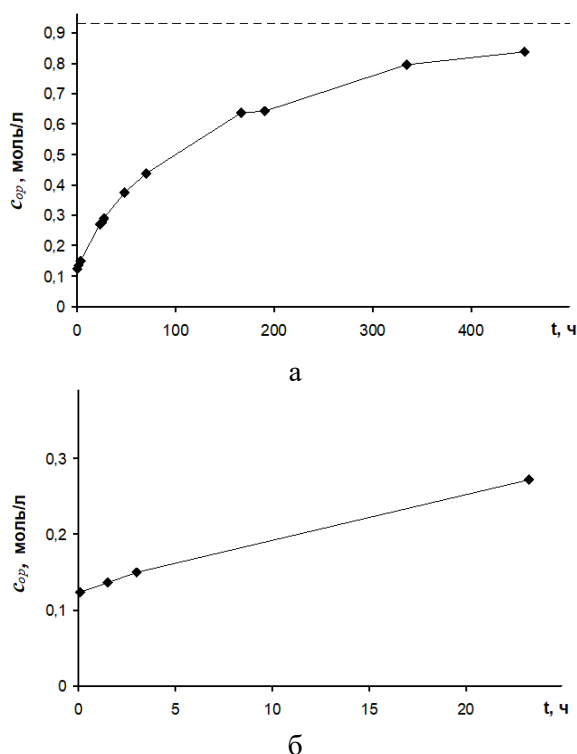


Рис. 4. Зависимости концентрации ортофосфорной кислоты в пробе, соответствующей 100 мл на выходной кривой опыта при 60°C от времени (а), начальный участок этой зависимости (б). Пунктиром показаны предельные концентрации ортофосфорной кислоты после полного гидролиза.

Fig. 4. The dependence of the concentration of orthophosphoric acid in a sample corresponding to 100 ml on the output curve of the experiment at 60°C on time (a), the initial section of this dependence (b). The dotted line shows the maximum concentrations of orthophosphoric acid after complete hydrolysis.

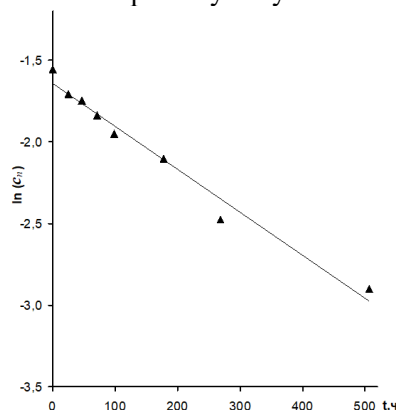


Рис. 5. Зависимость $\ln(c_n^o + 0.5 \cdot c_{op}^o - 0.5 \cdot c_{op})$ от t для опыта при 25°C, построенные на основании данных, представленных на рис. 3.

Fig. 5. Dependence $\ln(c_n^o + 0.5 \cdot c_{op}^o - 0.5 \cdot c_{op})$ of t for the experiment at 25°C, based on the data shown in Fig. 3.

Для других проб в каждом опыте получались аналогичные зависимости. В таблицах 1 и 2 представлены результаты расчета константы скорости реакции гидро-

лиза пирогосфорной кислоты. Полученные результаты (табл. 1-2) показали хорошую сходимость, $k_1 = (4.4 \pm 0.3) \cdot 10^{-5} \text{ мин}^{-1}$ для проб, полученных в ионообменном процессе при 25°C, и $k_1 = (8.3 \pm 0.5) \cdot 10^{-5}$

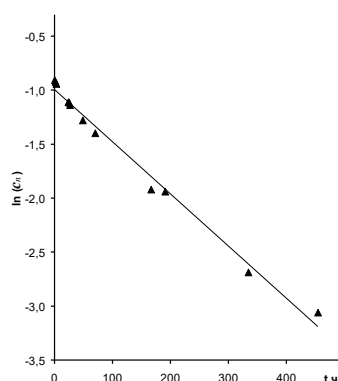


Рис. 6. Зависимости $\ln(c_n^o + 0.5 \cdot c_{op}^o - 0.5 \cdot c_{op})$ от t для опыта при 60°C, построенные на основании данных, представленных на рис.4.

Fig. 6. Dependences $\ln(c_n^o + 0.5 \cdot c_{op}^o - 0.5 \cdot c_{op})$ of t on the experiment at 60 °C, based on the data presented in Fig. 4.

Таблица 1. Результаты определения константы скорости реакции гидролиза пиррофосфорной кислоты в пробах, полученных в опыте при 25°C.

Table 1. Results of determining the rate constant of the hydrolysis reaction of pyrophosphoric acid in samples obtained experimentally at 25°C.

№ пробы	V , см ³	c_{op}^o , моль/дм ³	c_{op}^o , моль/дм ³	c_n^o , моль/дм ³	k_1 , мин ⁻¹
6	120	0.39	0.02	0.18	$3.8 \cdot 10^{-5}$
7	140	0.44	0.03	0.21	$4.2 \cdot 10^{-5}$
8	160	0.45	0.03	0.21	$4.5 \cdot 10^{-5}$
9	180	0.45	0.03	0.21	$4.5 \cdot 10^{-5}$
10	200	0.45	0.03	0.21	$4.3 \cdot 10^{-5}$
11	220	0.45	0.02	0.21	$4.8 \cdot 10^{-5}$
12	240	0.46	0.02	0.22	$4.5 \cdot 10^{-5}$
13	260	0.45	0.02	0.21	$4.7 \cdot 10^{-5}$

Таблица 2. Результаты определения константы скорости реакции гидролиза пиррофосфорной кислоты в пробах, полученных в опыте при 60°C.

Table 2. The results of the determination of the rate constant of the hydrolysis reaction of pyrophosphoric acid in samples obtained experimentally at 60°C.

№ пробы	V , см ³	c_{op}^o , моль/л	c_{op}^o , моль/дм ³	c_n^o , моль/дм ³	k_1 , мин ⁻¹
5	60	0.73	0.18	0.28	$8.2 \cdot 10^{-5}$
6	70	0.87	0.14	0.37	$9.2 \cdot 10^{-5}$
7	80	0.92	0.14	0.39	$8.5 \cdot 10^{-5}$
8	90	0.91	0.13	0.39	$8.2 \cdot 10^{-5}$
9	100	0.93	0.13	0.40	$8.0 \cdot 10^{-5}$
10	110	0.93	0.11	0.41	$8.3 \cdot 10^{-5}$
11	120	0.93	0.09	0.42	$8.3 \cdot 10^{-5}$
12	130	0.92	0.07	0.43	$7.5 \cdot 10^{-5}$

мин⁻¹ для проб, полученных в ионообменном процессе при 60°C. Различие констант скорости реакции гидролиза пиррофосфорной кислоты в этих двух случаях, протекающих при одной и той же темпе-

ратуре хранения проб при 25°C, по-видимому, связано с различием концентраций растворов кислот и возможным эффектом самокатализа.

Анализ изменения во времени состава фракции раствора, полученного в опыте

при 25°C и оставленного в контакте с небольшим количеством ионита в водородной форме, показал, что ионит не привел к ускорению реакции гидролиза пирофосфорной кислоты. Константа скорости гидролиза в данном случае составила $3.8 \cdot 10^{-5} \text{ мин}^{-1}$.

Заключение

Изучено получение пирофосфорной кислоты из пирофосфата натрия в колонках с сильнокислотным катионитом при температурах 25 и 60°C с акцентом на то, в какой степени пирофосфорная кислота успевает превратиться в ортофосфорную за время нахождения в ионообменной колонке и как быстро гидролиз продолжается в полученном фильтрате. Показано, что в фильтрате сразу после его отбора из колонки помимо пирофосфорной кислоты содержится некоторое количество ортофосфорной кислоты (6% от общего содержания фосфора представлено в виде

ортофосфорной кислоты при 25°C и 13% при 60°C). При последующем хранении фильтрата при 25°C гидролиз пирофосфорной кислоты продолжается, однако сравнительно медленно. Спустя 3 часа после получения раствора пирофосфорной кислоты степень ее превращения в ортофосфорную увеличивается относительно мало, а полный гидролиз пирофосфорной кислоты не происходит даже спустя 19-21 суток. Анализ зависимости степени гидролиза пирофосфорной кислоты от времени показал, что процесс происходит по кинетическому уравнению реакции первого порядка.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы/References

1. Corbridge D.E.C. Phosphorus. Chemistry, Biochemistry and Technology, Sixth Edition. 2013. Boca Raton: CRC Press. 1473 p.
2. Klement R. Condensed Orthophosphates. In: G. Brauer (ed.). Handbook of Preparative Inorganic Chemistry, 2nd ed. 1963. Vol. 2. NY: Academic Press. 546 p.
3. Safronova T.V., Kurbatova S.A., Shatalova T.B., Knot'ko A.V., Evdokimov P.V., Putlyaev V.I. Poroshok pirofosfata kal'ciya, sintezirovannyj iz pirofosfornoj kisloty i acetata kal'ciya, dlya polucheniya biokeramiki. *Materialovedenie*. 2016; 7(7): 41-48. (In Russ.)
4. Safronova T.V. Inorganic Materials for Regenerative Medicine. *Inorganic Materials*. 2021; 57(5): 443-474.
5. Corbridge D.E.C. Phosphates. Phosphorus – an Outline of its Chemistry, Biochemistry and Uses. *Studies in Inorganic Chemistry*. 1995; 20: 169-305.
6. Van Wazer J.R., Holst K.A. Structure and properties of the condensed phosphates. *ortho*phosphoric acids. *J. Am. Chem. Soc.* 1950; 72(2): 639-644.
7. Van Vazer. Fosfor i ego soedineniya. Per. s angl. Pod red. A.I. Pereshevskogo. M.: Inostr. lit. 1962. 477 p. (In Russ.)
8. Vulih A.I. Ionoobmennyyj sintez. M.: Khimiya, 1973. 231 p. (In Russ.)
9. Safronova T.V., Putlyaev V.I., Kurbatova S.A., Shatalova T.B., Larionov D.S., Kozlov D.A., Evdokimov P.V. Properties of Amorphous Calcium Pyrophosphate Powder Synthesized via Ion Exchange for the Preparation of Bioceramics. *Inorganic Materials*. 2015. 51(11): 1177-1184.
10. Safronova T.V., Kiselev A.S., Shatalova T.B., Filippov Ya.Yu., Gavlina O.T. Synthesis of double ammonium/ calcium pyrophosphate monohydrate $\text{Ca}(\text{NH}_4)_2\text{P}_2\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$ as the precursor of biocompatible phases of calcium phosphate ceramics. *Russian Chemical Bulletin*. 2020; 69(1): 139-147.
11. Gerber, A.B., Miles, F.T. Analyses of sodium meta-, pyro-, and orthophosphates:

With some annotations on methods. *Ind. Eng. Chem., Anal. Ed.* 1941; 13(6): 406-412.

12. McGilvery J.D., Crowther J.P. The hydrolysis of the condensed phosphates. II (a). The role of the hydrogen ion in the hydrolysis of sodium pyrophosphate: II (b). The dissociation constants of pyrophosphoric acid. *Can. J. Chem.* 1954; 32(2): 174-185.

13. Van Wazer J.R., Griffith E.J., McCullough J.F. Structure and properties of the condensed phosphates. VII. Hydrolytic degradation of pyro- and tripolyphosphate. *J. Am. Chem. Soc.* 1955; 77(2): 287-291.

14. Bunton C.A., Chaimovich H. The acid-catalyzed hydrolysis of pyrophosphoric

acid. *Inorganic Chemistry*. 1965; 4(12): 1763-1766.

15. Watters J.I., Loughran E.D., Lambert S.M. The Acidity trifosforic acid. *J. Am. Chem. Soc.* 1956; 78(19): 4855-4858.

16. Gavlina O.T., Ivanov V.A. Ionoobmennoe poluchenie pirofosfornoj kisloty pri povyshennyh temperaturah. *Sorbtsionnye i Khromatograficheskie Protssy*. 2021; 21(5): 616-622. (In Russ.)

17. Udobreniya mineral'nye. Metody opredeleniya fosfatov. 1997. M.: IPK izdatel'stvo standartov. GOST 20851.2-75 (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

О.Т. Гавлина – к.х.н., старший научный сотрудник, химический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, ogavlina@mail.ru

Е.А. Карпюк – к.х.н., доцент, химический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, kat_il@mail.ru

В.А. Иванов – д.х.н., профессор, химический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, ivanov@phys.chem.msu.ru

Т.В. Сафронова – к.т.н., старший научный сотрудник, химический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, safronovtv@my.msu.ru

O.T. Gavlina – Doctor of Chemistry, Senior Scientist. Department of Chemistry M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation, ogavlina@mail.ru

E.A. Karpyuk – Doctor of Chemistry, Docent. Department of Chemistry M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation, kat_il@mail.ru

V.A. Ivanov – Doctor of Chemistry, Professor. Department of Chemistry M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation, ivanov@phys.chem.msu.ru

T.V. Safronova – Doctor of Chemistry, Senior Scientist. Department of Chemistry M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation, safronovtv@my.msu.ru

Статья поступила в редакцию 11.05.2025; одобрена после рецензирования 30.06.2025; принята к публикации 06.07.2025.

The article was submitted 11.05.2025; approved after reviewing 30.06.2025; accepted for publication 06.07.2025.