

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,
НАНОСТРУКТУР
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

МЕЖВУЗОВСКИЙ СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

выпуск 10

ТВЕРЬ 2018

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

Рецензирование статей осуществляется на основании Положения о рецензировании статей и материалов для опубликования в Межвузовском сборнике научных трудов «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

**Официальный сайт издания в сети Интернет:
www.physchemaspects.ru**

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]: межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2018. – Вып. 10. – 708 с.

ISBN 978-5-7609-1395-1

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 7747789 от 13.12.2011.

Сборник составлен из оригинальных статей теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Сборник предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

ISBN 978-5-7609-1395-1

ISSN 2226-4442

© Коллектив авторов, 2018
© Тверской государственной
университет, 2018

УДК 546.41'185

АДСОРБЦИОННО-СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА КСЕРОГЕЛЕЙ ФОСФАТОВ КАЛЬЦИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ ЖИДКОФАЗНЫМ СИНТЕЗОМ

О.Н. Мусская, А.И. Кулак, В.К. Крутько, И.Е. Глазов
ГНУ «Институт общей и неорганической химии
Национальной академии наук Беларуси»
220072, Республика Беларусь, Минск, ул. Сурганова, 9/1
muskaja@igic.bas-net.by

DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.468

Аннотация: Показано, что высокой удельной поверхностью (до 158 м²/г) характеризуются ксерогели основных и средних фосфатов кальция, полученные дегидратацией кальцийфосфатных гелей на воздухе при 20 °С, водоотнимающими агентами, криогенной обработкой (при –18 и –196 °С). Выявлено, что высокотемпературный прогрев фосфатов кальция при 800–1200 °С приводит к значительному снижению их адсорбционной способности ($A_{\text{ВЕТ}}$ 10–17 м²/г).

Ключевые слова: кальцийфосфатный ксерогель, адсорбционно-структурные свойства, гидроксипатит, трикальцийфосфат, брушит, карбонатгидроксипатит.

1. Введение

Повышенный научный интерес к фосфатам кальция обусловлен их практическим применением в качестве биосовместимых компонентов остеопластических материалов [1-3]. Функциональные характеристики таких материалов определяются физико-химическими свойствами исходных фосфатов кальция. В частности, гидроксипатит (ГА) проявляет биоактивные свойства в гидратированной форме с нанометровым размером кристаллитов [4]. Температурная обработка приводит к удалению кристаллогидратной воды и укрупнению кристаллитов, вследствие чего ГА становится менее активным в биологических средах.

Основные способы получения фосфатов кальция – жидкофазный [5-7], твердофазный [8] и гидротермальный синтезы [9]. На практике преобладают методы синтеза фосфатов кальция из растворов, благодаря их простоте, малой энергоемкости и получению гомогенного конечного продукта, применение которого в составе различных материалов способствует достижению их однородной структуры. Кроме того, при разработке биоматериалов важным является повышение прочности сцепления компонентов, как за счет химического взаимодействия, так и межмолекулярных сил на поверхности раздела фаз.

В связи с этим цель работы состояла в получении фосфатов кальция из водных растворов и изучении влияния способов дегидратации и температуры на адсорбционно-структурные свойства кальцийфосфатных ксерогелей.

2. Методика эксперимента

Фосфаты кальция синтезировали из водных растворов 0,5–1,5 М CaCl_2 (либо $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) и 0,2–0,8 М $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ при варьировании pH 5–11 и соотношения Ca/P от 1,0 до 1,67 [10]. Полученные водные суспензии фосфатов кальция промывали до pH 7,0–7,4 и высушивали при 20–70 °С в течение 4 ч до получения ксерогелей. Кроме того, ксерогель ГА получали также дегидратацией его геля различными способами: 1) водоотнимающими агентами (ацетоном, этанолом) на фильтре Шотта с последующим досушиванием на воздухе при 60 °С; 3) криогенной обработкой при –18 °С (в морозильной камере) и при –196 °С (жидким азотом) с последующей декантацией и досушиванием на воздухе при 60 °С.

Синтез ГА осуществляли путем медленного приливания раствора $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ к раствору соли кальция в сильнощелочной среде (pH 10–11), создаваемой концентрированным раствором аммиака, при комнатной температуре (20 °С) и соотношении Ca/P 1,67. Реакционную смесь выдерживали под маточным раствором в течение 1–10 сут.

Трикальцийфосфат (ТКФ) получали путем быстрого сливания растворов солей, содержащих ионы кальция и фосфат-ионы, со слабощелочной средой (pH 7–8), создаваемой раствором аммиака, при комнатной температуре и соотношении Ca/P 1,5.

Брушит синтезировали путем медленного приливания водного раствора $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ к водному раствору соли кальция при температуре 0–20 °С, pH 5–6 и соотношении Ca/P 1,0.

Карбонатгидроксиапатит (КГА) получали осаждением из водных растворов 1,2–1,3 М CaCl_2 либо $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, 0,6 М $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ и 0,7 М $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ в щелочной среде (pH 9), создаваемой концентрированным раствором аммиака, с соотношением Ca/P 1,67 при комнатной (20 °С) либо повышенной (80 °С) температурах. Водную суспензию, полученную при комнатной температуре, выдерживали под маточным раствором в течение суток, а в случае синтеза при 80 °С – в течение 30 мин.

Рентгенофазовый анализ (РФА) ксерогелей фосфатов кальция проводили на дифрактометре ADVANCE D8 (Bruker, Германия) при $\text{Cu}_{\text{K}\alpha}$ 1,5405 Å. ИК-спектры образцов регистрировали на спектрометре Tenzor-27 (Bruker, Германия) в диапазоне 400–4000 cm^{-1} ; образцы прессовали в таблетки с бромидом калия. Дифференциальный термический анализ (ДТА) образцов проводили в потоке аргона на совмещенном термическом анализаторе NETZSCH STA 409 PC LUXX (Германия) при скорости нагрева 10,0 °С/мин. Адсорбционные свойства

ксерогелей фосфатов кальция определяли на анализаторе площади поверхности и пористости ASAP 2020 MP (США). Удельную поверхность рассчитывали методами одной точки (A_{sp}), Брунауэра-Эммета-Теллера – БЭТ ($A_{БЭТ}$) и Лэнгмюра (A_L). Адсорбционный объем пор (V_{spads}) определяли сравнительным методом t -графика. Адсорбционный кумулятивный объем пор ($V_{ВНHads}$) и средний диаметр пор ($D_{ВНHads}$) в диапазоне от 1,7 до 300 нм рассчитывали методом ВЈН (Барретт–Джойнер–Халенда).

3. Обсуждение результатов

Согласно данным РФА и ИК-спектроскопии синтезированные фосфаты кальция представляют собой однофазные ГА, β -ТКФ, КГА и брушит. Основные (ГА, КГА) и средние (β -ТКФ) фосфаты кальция после высушивания при 20–70 °С являются рентгеноаморфными, а при прогреве до 600–800 °С повышается степень их кристалличности. Однако КГА в этом температурном интервале становится неустойчивым и разлагается до ГА и оксида кальция. Кислый фосфат кальция (брушит) при высокотемпературном прогреве превращается в пирофосфат кальция. Анализ данных ДТА свидетельствует о том, что все ксерогели фосфатов кальция содержат кристаллогидратную воду, которая ступенчато удаляется при нагревании, как правило, до 200 °С.

По данным адсорбционно-структурного анализа (см. Таблицу 1) ксерогель ГА, высушенный при 20 °С, характеризуется высокой удельной поверхностью (A_{sp} 153 м²/г, $A_{БЭТ}$ 158 м²/г, A_L 218 м²/г), которая может быть обусловлена наличием пористой структуры, образованной за счет агрегации наночастиц ГА. В качестве активных центров могут выступать свободные ОН-группы, координированные катионом кальция. Повышение температуры прогрева образцов сопровождается удалением кристаллогидратной воды и снижением их удельной поверхности, что становится особенно заметным в области высоких температур. В частности, при 800–1200 °С наблюдается существенное уменьшение (в 10–14 раз) адсорбционного объема пор, при этом мелкие поры схлопываются с образованием более крупных пор.

Изоморфные замещения в апатитовой структуре в случае КГА приводят к уменьшению количества ОН-групп, а, следовательно, и активных центров, вследствие чего наблюдается снижение удельной поверхности по сравнению со стехиометрическим ГА (см. Таблицу 1). Кроме того, при повышении температуры синтеза до 80 °С КГА образуется с заметно более низкими значениями удельной поверхности.

В случае β -ТКФ отсутствие активных центров приводит к падению удельной поверхности практически в 2 раза по сравнению с ГА

(см. Таблицу 1). Влияние фазового состава на адсорбционно-структурные характеристики кальцийфосфатных ксерогелей наглядно демонстрируется на примере механических смесей ГА/ β -ТКФ: значения удельной поверхности повышаются пропорционально с ростом содержания ГА.

Ксерогель брушита характеризуется слабо выраженными сорбционными свойствами ($A_{ВЕТ}$ 7 м²/г, см. Таблицу 1). Вероятно, присутствие кислых фосфатных групп в его структуре приводит к появлению неактивных участков поверхности. Кроме того, кислый фосфат кальция изначально обладает хорошо сформированной кристаллической решеткой, при этом первичные кристаллиты имеют большие размеры (до 60 нм), вследствие чего происходит снижение дисперсности образца.

Таблица 1. Адсорбционно-структурные характеристики фосфатов кальция, полученных жидкофазным синтезом

Состав	Температура обработки, °С	A_{sp} , м ² /г	$A_{ВЕТ}$, м ² /г	A_L , м ² /г	V_{spads} , см ³ /г	$V_{ВНHads}$, см ³ /г	$D_{ВНHads}$, нм
ГА	20	153	158	218	0,477	0,483	11,0
	40	140	145	199	0,486	0,491	11,2
	60	124	127	175	0,482	0,487	14,0
	800	16	17	24	0,047	0,059	14,5
	1200	7	10	15	0,033	0,045	21,0
КГА	60	80	85	121	0,171	0,214	10,1
	80	37	40	57	0,108	0,175	21,0
β -ТКФ	20	82	88	123	0,339	0,343	15,3
	70	51	53	75	0,223	0,244	12,8
ГА/ β -ТКФ 50:50	60-70	105	110	154	0,425	0,430	13,1
ГА/ β -ТКФ 30:70	60-70	91	94	132	0,372	0,375	13,5
Брушит	50	7	7	11	0,019	0,021	29,0

Анализ данных о физической адсорбции азота показывает, что ксерогели ГА, КГА и β -ТКФ характеризуется наличием узкой петли гистерезиса на изотермах адсорбции (см. рис. 1, изотермы 1-4).

В соответствии с классификацией IUPAC [11] ксерогели основных и средних фосфатов кальция описываются V типом изотерм адсорбции, который характерен для пористых адсорбентов со слабым взаимодействием адсорбент-адсорбат и свидетельствует о наличии мезопор. В случае ксерогелей брушита и ГА, прогретого при 800 °С, изотермы адсорбции демонстрируют слабовыраженные адсорбционно-структурные свойства образцов (см. рис. 1, изотермы 5, 6).

Максимальное значение десорбционного объема мезопор (0,050 см³/г·нм), рассчитанное из дифференциальных кривых по методу ВЖН, характерно для ксерогеля ГА (см. рис. 2). В случае КГА и средних

фосфатов кальция эта величина уменьшается до 0,014–0,035 см³/г·нм, что согласуется с более низкими значениями удельной поверхности этих ксерогелей по сравнению с ксерогелем ГА.

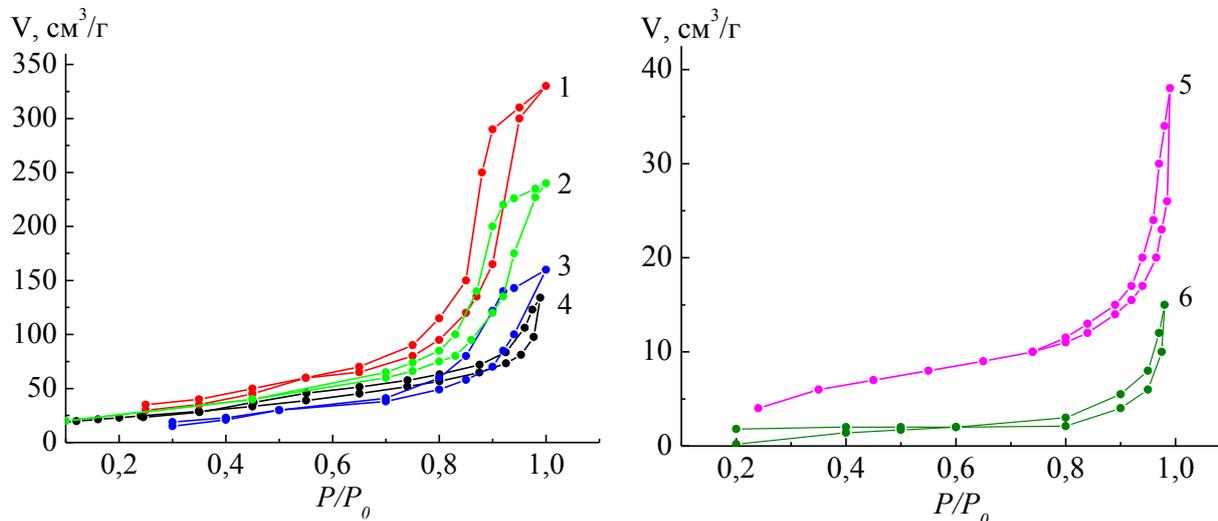


Рис. 1. Изотермы низкотемпературной адсорбции-десорбции кальцийфосфатных ксерогелей: 1 – ГА (60 °С); 2 – ГА(60 °С)/ β – ТКФ(70 °С) 30 : 70; 3 – β – ТКФ (70 °С); 4 – КГА (60 °С); 5 – ГА (800 °С); 6 – брушит (50 °С).

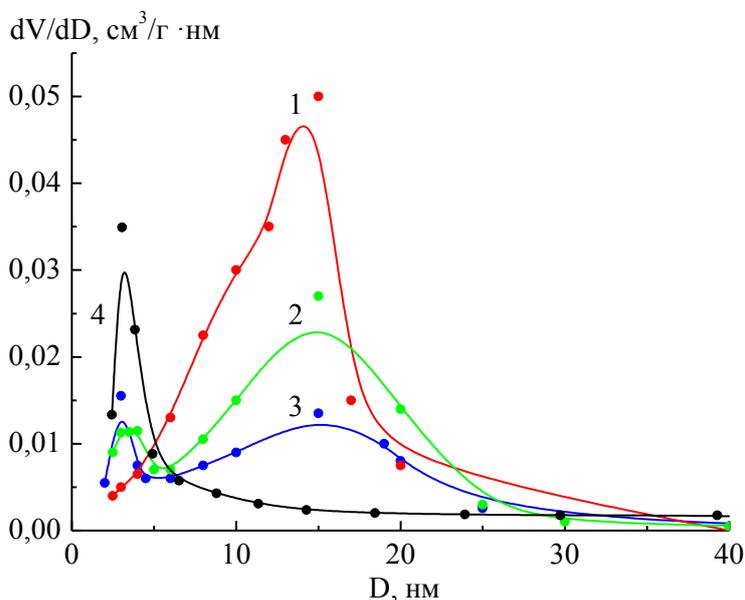


Рис. 2. Кривые дифференциального распределения десорбционного объема пор кальцийфосфатных ксерогелей: 1 – ГА (60 °С); 2 – ГА(60 °С)/ β – ТКФ(70 °С) 30 : 70 ; 3 – β – ТКФ (70 °С); 4 – КГА (60 °С).

Установлено, что способ дегидратации кальцийфосфатного геля оказывает влияние на адсорбционно-структурные свойства его ксерогеля (см. Таблицу 2). В частности, обезвоживание водоотнимающими агентами

либо криогенная обработка при -18°C геля ГА способствуют повышению удельной поверхности образцов в 1,2 раза (по сравнению с высушиванием при 60°C). По петле капиллярно-конденсационного гистерезиса изотермы адсорбции (см. рис. 3 а) ксерогелей ГА, полученных различными способами, можно отнести к типу Н2, что характерно для сложных структур с взаимно связанными порами [11].

Объем пор и средний диаметр пор частиц ксерогеля ГА после разных способов дегидратации составляет $0,4-0,8\text{ см}^3/\text{г}$ и $11-19\text{ нм}$ соответственно (см. Таблицу 2). Наибольшими средним размером и объемом пор характеризуется порошок ГА после обезвоживания ацетоном, что позволяет судить о наиболее «полном» удалении воды из геля ГА этим способом. Кроме того, после обезвоживания ацетоном кривая дифференциального распределения десорбционного объема пор (см. рис. 3 б) охватывает достаточно широкий размерный диапазон. Ксерогель ГА, обезвоженный этанолом и криогенной обработкой, обладает более мелкими порами со средним диаметром $11-16\text{ нм}$.

Таблица 2. Адсорбционно-структурные характеристики ксерогелей ГА, дегидратированных разными способами

Способ обработки	$A_{sp}, \text{ м}^2/\text{г}$	$A_{ВЕТ}, \text{ м}^2/\text{г}$	$A_L, \text{ м}^2/\text{г}$	$V_{spads}, \text{ см}^3/\text{г}$	$V_{ВННads}, \text{ см}^3/\text{г}$	$D_{ВННads}, \text{ нм}$
ацетоном	151	155	211	0,774	0,791	19
этанолом	146	150	207	0,566	0,580	14
при -18°C	151	155	213	0,487	0,493	11
при -196°C	104	108	149	0,446	0,450	16

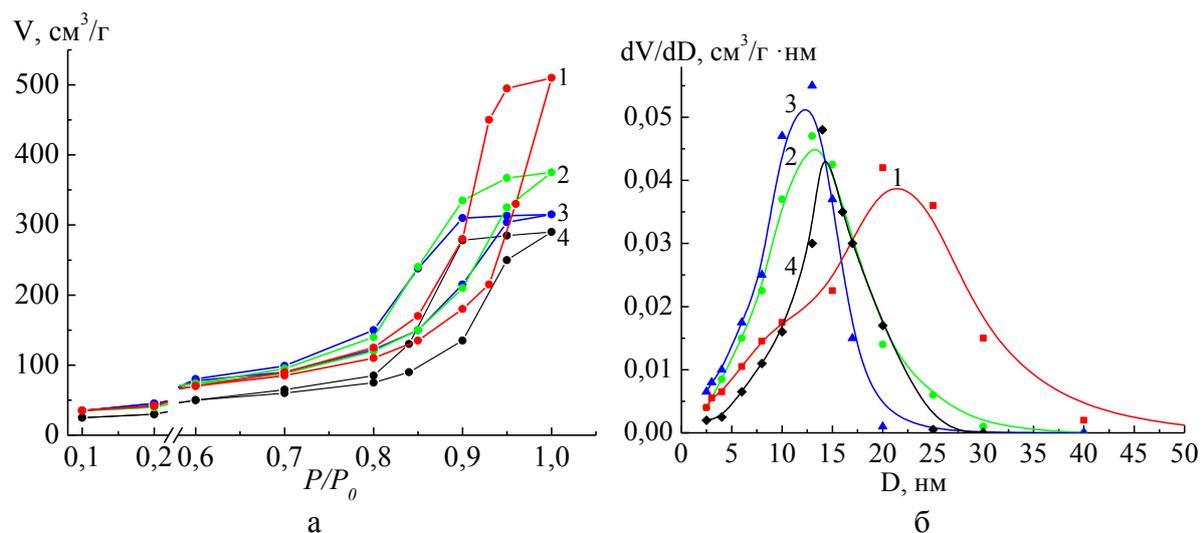


Рис. 3. Изотермы низкотемпературной адсорбции-десорбции (а) и кривые дифференциального распределения десорбционного объема пор (б) ксерогелей ГА, дегидратированных разными способами: 1 – ацетоном; 2 – этанолом; 3 – при -18°C ; 4 – при -196°C .

4. Заключение

Таким образом, жидкофазным методом из водных растворов солей кальция (хлорида, нитрата) и гидрофосфата аммония при pH 5–11 при соотношении Ca/P 1,0–1,67 получены гели фосфатов кальция (ГА, β -ТКФ, КГА, брушита). Дегидратация геля ГА на воздухе при 20 °С, водоотнимающими агентами (ацетоном, этанолом), криогенной обработкой (при –18 и –196 °С) позволяют получить мезопористые ксерогели с высокой удельной поверхностью ($A_{ВЕТ}$ 88–158 м²/г). Показано, что брушит, высушенный при 50 °С, обладает низкой адсорбционной способностью ($A_{ВЕТ}$ 7 м²/г). Установлено, что удельная поверхность основных и средних фосфатов кальция снижается в 1,2–1,7 раза после высушивания их гелей при 60–70 °С, а при высокотемпературном прогреве (800–1200 °С) в 9–16 раз.

Работа выполнена при поддержке программы ГПНИ «Химические технологии и материалы» (задание 1.04).

Библиографический список:

1. Крутько, В.К. Термические превращения в композиционных материалах на основе гидроксиапатита и диоксида циркония / В.К. Крутько, А.И. Кулак, О.Н. Мусская // Неорганические материалы. – 2017. – Т. 53. – № 4. – С. 427-434.
2. Мусская, О.Н. Физико-химические свойства цементов на основе суспензий фосфатов кальция / О.Н. Мусская, В.К. Крутько, А.И. Кулак // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2017. – Вып. 9. – С. 317-322.
3. Yanovska, A. Synthesis and characterization of hydroxyapatite-gelatine composite materials for orthopedic application / A. Yanovska, V. Kuznetsov, A. Stanislavov, et al. // Materials Chemistry and Physics. – 2016. – V. 183. – I. 1. – P. 93-100.
4. Крутько, В.К. Влияние способа дегидратации геля гидроксиапатита на физико-химические свойства нанокристаллического ксерогеля / В.К. Крутько, А.И. Кулак, Л.А. Лесникович и др. // Журнал общей химии. – 2007. – Т. 77. – № 3. – С. 366-373.
5. Пономарева, Н.И. Кристаллическая структура и состав биоконпозитов гидроксиапатита, полученных при избытке иона кальция / Н.И. Пономарева, Т.Д. Попрыгина, М.В. Лесовой и др. // Журнал общей химии. – 2009. – Т. 79. – № 2. – С. 198-202.
6. Фадеева, Е.Ю. Синтез наночастиц фосфатов кальция, стабилизированных цитратом натрия / Е.Ю. Фадеева, М.Ю. Королева // Успехи в химии и химической технологии. – 2015. – Т. 29. – № 6 (165). – С. 128-129.
7. Raynaud, S. Calcium phosphate apatites with variable Ca/P atomic ratio I. Synthesis, characterisation and thermal stability of powders / S. Raynaud, E. Champion, D. Bernache-Assollant, P. Thomas // Biomaterials. – 2002. – V. 23. – I. 4. – P. 1065-1072.
8. Ramachandra Rao, R. Solid state synthesis and thermal stability of HAP and HAP – β -TCP composite ceramic powders / R. Ramachandra Rao, H.N. Roopa, T.S. Kannan // Journal of Materials Science: Materials in Medicine. – 1997. – V. 8. – I. 8.

– P. 511-518.

9. **Hiroaki, K.** Microwave versus conventional - hydrothermal synthesis of hydroxyapatite crystals from gypsum / K. Hiroaki, F. Sachiko, K. Sridhar // Journal of the American Ceramic Society. – 1999. – V. 82. – I. 8. – P. 2257-2259.

10. **Мусская, О.Н.** Получение биоактивных мезопористых кальцийфосфатных гранул / О.Н. Мусская, А.И. Кулак, В.К. Крутько и др. // Неорганические материалы. – 2018. – Т. 54. – № 2. – С. 130-137.

11. **Thommes, M.** Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report) / M. Thommes, K. Kaneko, A.V. Neimark, et al. // Pure and Applied Chemistry. – 2015. – V. 87. – I. 9-10. – P. 1051-1069.

References:

1. **Krut'ko, V.K.** Termicheskie prevrashcheniya v kompozicionnyh materialah na osnove gidroksiapatita i dioksida cirkoniya / V.K. Krut'ko, A.I. Kulak, O.N. Musskaya // Neorganicheskie materialy. – 2017. – V. 53. – I. 4. – P. 427-434.

2. **Musskaya, O.N.** Fiziko-himicheskie svojstva cementov na osnove suspenzij fosfatov kal'ciya / O.N. Musskaya, V.K. Krut'ko, A.I. Kulak // Fiziko-himicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov. – 2017. – I. 9. – P. 317-322.

3. **Yanovska, A.** Synthesis and characterization of hydroxyapatite-gelatine composite materials for orthopedic application / A. Yanovska, V. Kuznetsov, A. Stanislavov, et al. // Materials Chemistry and Physics. – 2016. – V. 183. – I. 1. – P. 93-100.

4. **Krut'ko, V.K.** Vliyanie sposoba degidratacii gelya gidroksiapatita na fiziko-himicheskie svojstva nanokristallicheskogo kserogelya / V.K. Krut'ko, A.I. Kulak, L.A. Lesnikovich i dr. // Zhurnal obshchej himii. – 2007. – V. 77. – no 3. – P. 366-373.

5. **Ponomareva, N.I.** Kristallicheskaya struktura i sostav biokompozitov gidroksiapatita, poluchennyh pri izbytkе iona kal'ciya / N.I. Ponomareva, T.D. Poprygina, M.V. Lesovoj i dr. // Zhurnal obshchej himii. – 2009. – T. 79. – № 2. – S. 198-202.

6. **Fadeeva, E.Yu.** Sintez nanochastic fosfatov kal'ciya, stabilizirovannyh citratom natriya / E.Yu. Fadeeva, M.Yu. Koroleva // Uspekhi v himii i himicheskoy tekhnologii. – 2015. – V. 29. – no. 6(165). – P. 128-129.

7. **Raynaud, S.** Calcium phosphate apatites with variable *Ca/P* atomic ratio I. Synthesis, characterisation and thermal stability of powders / S. Raynaud, E. Champion, D. Bernache-Assollant, P. Thomas // Biomaterials. – 2002. – V. 23. – I. 4. – P. 1065-1072.

8. **Ramachandra Rao, R.** Solid state synthesis and thermal stability of HAP and HAP – β -TCP composite ceramic powders / R. Ramachandra Rao, H.N. Roopa, T.S. Kannan // Journal of Materials Science: Materials in Medicine. – 1997. – V. 8. – I. 8. – P. 511-518.

9. **Hiroaki, K.** Microwave versus conventional - hydrothermal synthesis of hydroxyapatite crystals from gypsum / K. Hiroaki, F. Sachiko, K. Sridhar // Journal of the American Ceramic Society. – 1999. – V. 82. – I. 8. – P. 2257-2259.

10. **Musskaya, O.N.** Poluchenie bioaktivnyh mezoporistyh kal'cijfosfatnyh granul / O.N. Musskaya, A.I. Kulak, V.K. Krut'ko i dr. // Neorganicheskie materialy. – 2018. – V. 54. – no. 2. – P. 130-137.

11. **Thommes, M.** Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report) / M. Thommes, K. Kaneko, A.V. Neimark, et al. // Pure and Applied Chemistry. – 2015. – V. 87. – I. 9-10. – P. 1051-1069.

**ADSORPTION-STRUCTURAL PROPERTIES OF CALCIUM PHOSPHATES XEROGELS
OBTAINED BY LIQUID-PHASE SYNTHESIS**

Musskaya O.N., Kulak A.I., Krut'ko V.K., Glazov I.E.

Institute of General and Inorganic Chemistry of National Academy of Sciences of Belarus

DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.468

Abstract: It has been established that xerogels of basic and medium calcium phosphates obtained by dehydration of calcium phosphate gels in air at 20 °C with water-removing agents, cryogenic treatment (at –18 and –196 °C) are characterized by a high specific surface (up to 158 m²/g). It was found that high-temperature heating of calcium phosphates at 800–1200 °C leads to a significant decrease in their adsorption capacity (A_{BET} 10–17 m²/g).

Keywords: calcium phosphate xerogel, adsorption-structural properties, hydroxyapatite, tricalcium phosphate, brushite, carbonate hydroxyapatite.

Мусская Ольга Николаевна – к.х.н., доцент, старший научный сотрудник лаборатории фотохимии и электрохимии ГНУ «Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси»

Кулак Анатолий Иосифович – член-корреспондент НАН Беларуси, д.х.н., профессор, директор ГНУ «Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси»

Крутько Валентина Константиновна – к.х.н., доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории фотохимии и электрохимии ГНУ «Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси»

Глазов Илья Евгеньевич – младший научный сотрудник лаборатории фотохимии и электрохимии ГНУ «Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси»

Olga N. Musskaya – Ph. D., Docent, Senior Researcher of Photochemistry and Electrochemistry Laboratory, Institute of General and Inorganic Chemistry of National Academy of Sciences of Belarus

Anatoly I. Kulak – Corresponding Member, D. Sc., Professor, Institute of General and Inorganic Chemistry of National Academy of Sciences of Belarus, Director

Valentina K. Krut'ko – Ph. D., Docent, Leading Researcher of Photochemistry and Electrochemistry Laboratory, Institute of General and Inorganic Chemistry of National Academy of Sciences of Belarus

Ilya E. Glazov – Junior Researcher of Photochemistry and Electrochemistry Laboratory, Institute of General and Inorganic Chemistry of National Academy of Sciences of Belarus