

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

ХИМИЯ
CHEMISTRY

УДК 628.16
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-2-111-118>

Поступило в редакцию 16.11.2022
Received 16.11.2022

**А. Д. Воробьев¹, академик А. В. Бильдюкевич², Е. В. Воробьева¹,
С. В. Буча¹, М. А. Астахова¹**

¹*Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь*

²*Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь*

**ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ КАРБОКСИЛСОДЕРЖАЩИХ
ПОЛИМЕРОВ НА МОРФОЛОГИЮ ОСАДКОВ
И УСТОЙЧИВОСТЬ ДИСПЕРСИЙ КАРБОНАТОВ**

Аннотация. С целью изучения влияния молекулярно-структурного строения карбоксилсодержащих полимеров на их ингибирующее и стабилизирующее действие в процессах осадкообразования был исследован ряд полимерных кислот с различным содержанием карбоксильных групп (X): полиакриловая кислота ($M_n = 5100$ г-моль⁻¹, $X = 61,11$ %), полиметакриловая кислота ($M_n = 5500$ г-моль⁻¹, $X = 48,79$ %), сополимер метакриловой кислоты с терпеном скипидара (α -пинен) ($M_n = 3500$ г-моль⁻¹, $X = 14,54$ %). Установлено, что введение поликислот замедляет процесс роста кристаллов и приводит к изменению морфологии и структуры осадка карбонатов в результате рекристаллизации аморфной фазы в более устойчивые кристаллические формы. Показано, что поликарбоновые кислоты повышают коллоидную стабильность смешанной дисперсии карбонатов и каолина. Отмечен синергизм стабилизирующего действия смесей поликислот с различной гидрофобностью: в присутствии смеси полиакриловой кислоты с сополимером метакриловой кислоты с терпеном скипидара стабилизационный эффект возрастает 2 раза по сравнению с дисперсией без добавок и в 1,4–1,8 раза по сравнению с индивидуальными компонентами смеси.

Ключевые слова: полиакриловая кислота, полиметакриловая кислота, сополимер метакриловой кислоты с терпеном скипидара, ингибитор, дисперсант, стабилизационный эффект

Для цитирования. Влияние химической структуры карбоксилсодержащих полимеров на морфологию осадков и устойчивость дисперсий карбонатов / А. Д. Воробьев [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2023. – Т. 67, № 2. – С. 111–118. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-2-111-118>

**Artem D. Vorobiev¹, Academician Alexander V. Bilydukevich², Elena V. Vorobieva¹,
Svetlana V. Bucha¹, Marina A. Astahova¹**

¹*Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

²*Institute of Physical and Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

**EFFECT OF THE CHEMICAL STRUCTURE OF CARBOXYL-CONTAINING POLYMERS
ON PRECIPITATE MORPHOLOGY AND CARBONATE DISPERSIONS STABILITY**

Abstract. The influence of the molecular structure of carboxyl-containing polymers on their inhibitory and stabilizing effect in the precipitation processes was studied using a number of polymeric acids with different contents of carboxyl groups (X): polyacrylic acid ($M_n = 5100$ g-mol⁻¹, $X = 61.11$ %), polymethacrylic acid ($M_n = 5500$ g-mol⁻¹, $X = 48.79$ %), copolymer of methacrylic acid with turpentine terpene (α -pinene) ($M_n = 3500$ g-mol⁻¹, $X = 14.54$ %). It has been established that polyacid molecules slow down the process of crystal growth and recrystallization of the amorphous phase into more stable crystalline forms, which leads to a change in the morphology and structure of a carbonate precipitate. It has also been shown that polycarboxylic acids increase the colloidal stability of a mixed dispersion of carbonates and kaolin. The synergism of the stabilizing effect of mixtures of different hydrophobicity-polyacids was noted: in the presence of a mixture of polyacrylic acid with a copolymer of methacrylic acid with turpentine terpene, the stabilization effect increases 2 times compared to dispersion without additives and 1.4–1.8 times compared with individual components of the mixture.

Keywords: polyacrylic acid, polymethacrylic acid, copolymer of methacrylic acid with turpentine terpene, inhibitor, dispersant, stabilizing effect

For citation. Vorobiev A. D., Bilydukevich A. V., Vorobieva E. V., Bucha S. V., Astahova M. A. Effect of the chemical structure of carboxyl-containing polymers on precipitate morphology and carbonate dispersions stability. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2023, vol. 67, no. 2, pp. 111–118 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-2-111-118>

Введение. Карбоксилсодержащие полимеры, в частности поликарбоновые кислоты, находят широкое применение в качестве реологических модификаторов, сорбентов, пленочных покрытий, флокулянтов для очистки сточных вод, стабилизаторов эмульсий, суспендирующих агентов для фармацевтических систем доставки и т. д. [1–3].

В последнее время поликарбоновые кислоты предлагают для ингибирования процессов осадкообразования в водных охлаждающих оборотных системах и обратноосмотической очистке воды. Отмечается важная для практики функция поликислот стабилизировать минеральные дисперсные системы, что препятствует агрегации коллоидных и кристаллических частиц и образованию плотного осадка на поверхности мембран и теплообменников [4; 5].

Кроме практического использования, карбоксилсодержащие полимеры представляют интерес как модельные полимерные системы, изучение свойств которых в зависимости от химической структуры позволит глубже понять механизм влияния полимеров на процессы кристаллизации, устойчивость минеральных и коллоидных систем.

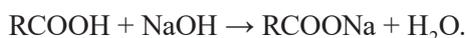
Поскольку молекулы полиэлектролитов содержат заряженные функциональные группы и гидрофобные фрагменты, то при переходе от бинарной системы «полиэлектролит–вода» к трехкомпонентной «полиэлектролит–вода–раствор соли» и четырехкомпонентной, дополнительно содержащей дисперсию из кристаллов солей и коллоидных частиц, может происходить взаимодействие компонентов системы с формированием новых структур, обусловленное как электростатическими свойствами заряженных функциональных групп, так и внутри- и межмолекулярной ассоциацией гидрофобных фрагментов. Сорбционные свойства полиэлектролитов оказывают влияние на их способность модифицировать кристаллическую структуру осадков и стабилизировать дисперсную фазу [6; 7].

Несмотря на значительный интерес к использованию полимерных ингибиторов в водооборотных системах и в установках мембранной очистки воды, вопросы влияния строения карбоксилсодержащих полимеров на их ингибирующее и стабилизирующее действие в процессах осадкообразования мало изучены.

В данном сообщении приведены результаты исследования влияния поликарбоновых кислот с различным соотношением полярных и неполярных групп на структуру кристаллического осадка карбонатов кальция и магния и седиментационную устойчивость смешанной дисперсии карбонатов и глинистых частиц.

Экспериментальная часть. В экспериментах использовали хлорид кальция, магния, гидроксид кальция (марка «чда»), каолин (ГОСТ 21285–75), а также полиакриловую кислоту (ПАК, молекулярная масса $5,1 \cdot 10^3$), полиметакриловую кислоту (ПМК, молекулярная масса $5,5 \cdot 10^3$ (Sigma-Aldrich)) и сополимер метакриловой кислоты с терпеном скипидара (α -пинен) (СМК-П; молекулярная масса $3,5 \cdot 10^3$)¹.

Содержание карбоксильных групп в выбранных полимерах определяли титрованием растворенной навески полимера щелочью [8]



Для этого в мерную колбу объемом 50 мл помещали 0,3 г исследуемого вещества, взвешенного с точностью до 0,0002 г, и доводили до метки бидистиллированной водой, затем, после полного растворения навески, растворы полимеров пропускали через сильнокислотный катионит в Н-форме (марка КУ 2-8), после чего титровали из микробюретки 0,1 н раствором NaOH измеряя pH равновесного раствора при помощи pH-метра MettlerToledo до тех пор, пока изменение pH не становилось незначительным. Анализировали две пробы, параллельно проводили контрольный опыт с тем же количеством растворителя.

Содержание карбоксильных групп X (%) вычисляли по формуле

$$X = \frac{(V_1 - V_2)F \cdot 0,0045 \cdot 100}{g},$$

где V_1 – объем 0,1 н раствора NaOH, израсходованного на титрование пробы с навеской полимера, см³; V_2 – объем 0,1 н раствора NaOH, израсходованного на титрование пробы с контрольной

¹ Способ получения сополимера метакриловой кислоты с терпенами: а. с. 1435580 СССР, МКИ С 08 F 220/06 / Л. М. Старкова, Н. П. Крутько, Е. В. Воробьева; № 4154500/23-05; заявл. 01.12.86; опубл. 07.11.88 // Открытия. Изобрет. – 1988. – № 41. – С. 83.

пробы, см³; g – масса навески, г; F – поправочный коэффициент 0,1 н раствора щелочи; 0,0045 – количество СООН-групп, соответствующее 1 мл точно 0,1 н раствора щелочи, г.

По результатам исследования содержание карбоксильных групп для полимеров составило: X (ПАК) – 61,11 %, X (ПМК) – 48,79 %, X (СМК-П) – 14,54 %. Таким образом, выбранные полимеры можно расположить в ряд по увеличению доли неполярных групп следующим образом: СМК-П > ПМК > ПАК.

Для приготовления модельных растворов хлорид кальция, хлорид магния и гидрокарбонат кальция растворяли в дистиллированной воде с молярным соотношением $\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+}$, равным 3,7. pH раствора доводили до значения 9,0 при помощи 0,1 М раствора NaOH. Осаждение карбонатов из полученных модельных растворов проводили при температуре (80 ± 5) °С при непрерывном перемешивании в течение 3 ч. Затем образовавшийся осадок отфильтровывали на бумажном фильтре «синяя лента» и сушили при комнатной температуре.

Исследование седиментационной устойчивости смешанной дисперсии карбонатов кальция и магния и каолина (в количестве 95 и 5 % от общей массы твердой фазы соответственно) без добавок и в присутствии полимеров проводили следующим образом: 1,0 г навески твердой фазы добавляли к 99,0 г дистиллированной воды, при необходимости вводили полимерные добавки (0,1 мг/л), перемешивали с использованием магнитной мешалки со скоростью 600 об/мин в течение 60 мин при постоянной температуре (22 ± 1) °С. Аликвоту полученной дисперсии объемом 10 мл переносили в мерную колбу и доводили до 100 мл дистиллированной водой. Измерение оптической плотности (D) образцов, помещенных в стеклянную кювету толщиной 30 мм, проводили с использованием спектрофотометра Cary Win UV50 при длине волны 450 нм через определенные интервалы времени.

Исследование размера частиц проводили на автоматическом фотоседиментометре ФСХ-4; структуры и формы частиц осадка – с использованием электронного сканирующего микроскопа JSM-5610 6 LV с системой химического анализа EDXJED-2201 JEOL (Япония). Изображения образцов получали с рабочим разрешением 3,5 нм (ускоряющее напряжение первичного электронного пучка 20 кВ) с использованием детектора обратно отраженных электронов.

Результаты и их обсуждение. Влияние полиэлектролитов на физико-химические свойства системы, в которой одновременно происходит несколько взаимосвязанных процессов – кристаллизация карбонатов кальция и магния из растворов, формирование дисперсий кристаллических и коллоидных частиц, переход от гомогенной к гетерогенной системе – изучено в отношении морфологии и структуры кристаллизующихся осадков и в отношении сформированных смешанных дисперсий карбонатов и коллоидных глинистых частиц.

В процессе кристаллизации карбонатов кальция и магния из растворов возможно образование различных полиморфных модификаций – магнезиальный кальцит, арагонит и ватерит. В условиях проведения исследований, как правило, образуется смесь трех полиморфов [9; 10]. Как видно из рис. 1, в присутствии полимера в процессе роста частиц органические молекулы, вероятно, стабилизируют частицы ватерита, выборочно сорбируясь на поверхности кристаллов, и ограничивают рост более стабильных форм. Добавление полимеров, помимо стабилизации ватерита, также приводит к изменению морфологии и структуры частиц.

Как видно из рис. 1, *a*, твердая фаза осадка, полученного в отсутствие полимера, представлена зернами столбчатого габитуса, которые образуют хаотически распределенные сростки, трубчатые друзы либо правильные кубики. Их анизометрический габитус и тенденция к направленному росту указывают на кристаллическое строение.

Микрофотографии структуры твердой фазы, образовавшейся в аналогичной системе в присутствии ПАК, представлены на рис. 1, *b*. В данном случае структура осадка существенно отличается от фазы, образующейся в отсутствие полимера, и представлена, в основном, агломератами зерен округлой формы. Осадок, представленный частицами округлой формы, наблюдается также и в системах с полиметакриловой кислотой (рис. 1, *c*), которые характеризуются меньшим размером и практически полным отсутствием столбчатых и кубических кристаллов.

Введение в систему до начала кристаллизации синтезированного полимера (СМК-П) приводит к более развитой и неоднородной поверхности частиц по сравнению с системами, содержащими поликислоты с меньшей долей гидрофобных групп (рис. 1, *d*).

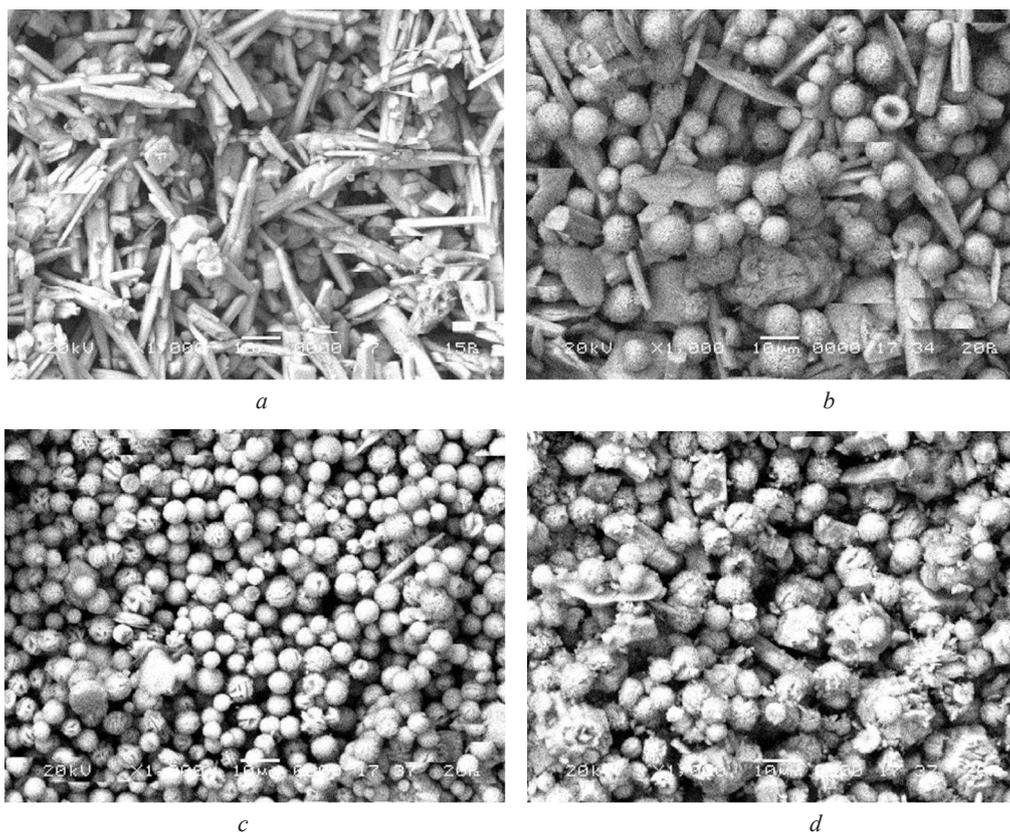


Рис. 1. Фотографии (увеличение в 1000 раз) осадка карбонатов кальция и магния, полученного без добавок (*a*) и в присутствии ПАК (*b*), ПМК (*c*) и СМК-II (*d*)

Fig. 1. Photos ($\times 1000$) of the calcium and magnesium carbonate precipitate obtained without additives (*a*) and in the presence of PAA (*b*), PMA (*c*) and CMA-P (*d*)

Взаимодействие ионизированных карбоксильных групп поликислот с ионами кальция и магния, расположенными на поверхности растущего кристалла, сопровождается экранизацией поверхностного заряда. Наличие гидрофобного радикала поликислот затрудняет доступ карбонат-ионов к поверхности кристалла, способствует замедлению его роста и изменению габитуса, тормозит рекристаллизацию в более устойчивые кристаллические формы.

В [11; 12] предполагается, что способность данных соединений к модификации кристаллической структуры карбонатных осадков также обусловлена структурно-геометрическим подобием карбоксилат- и карбонат-ионов. При взаимодействии кислородных атомов карбонатной группы с карбоксилат-ионами эквивалентность связей нарушается, что является причиной ростовой дисимметризации карбонатных структур и изменения структуры кристалла.

На фотографиях дисперсии, полученной в присутствии смеси полимеров с различной гидрофобностью, видны частицы изометрического габитуса аморфной структуры, причем размер частиц уменьшается при введении в дисперсию смеси ПАК с СМК-II с низким содержанием гидрофобного компонента (рис. 2). Соотношение ПАК к СМК-II 9 : 1 было выбрано как наиболее эффективное согласно результатам предварительных исследований данных полимерных соединений на лабораторной модельной установке РМАС SCL, описанной в [13].

Глобулярный габитус кристаллов карбонатов, формирующихся в присутствии смеси поликислот с различной долей гидрофобных и гидрофильных групп, обусловлен адсорбцией полимеров на поверхности растущего кристалла и частичной инкорпорацией молекул полимера в неорганическую матрицу. Структура полимерных цепей, находящихся в среде с ионами, приводит к формированию неоднородной поверхности растущих частиц.

В присутствии поликислот наблюдается увеличение коллоидной стабильности дисперсии, обеспечивается взвешенное состояние частиц, что приводит к повышению оптической плотности системы. На рис. 3 приведены результаты исследования кинетической (седиментационной)

устойчивости дисперсии карбонатов с каолином. Из рис. 3 видно, что оптическая плотность без добавок полимеров со временем снижается и через 3–4 ч достигает минимума (0,02), что свидетельствует о низкой седиментационной устойчивости системы. В присутствии ПАК оптическая плотность дисперсии в среднем в 1,4 раза выше, чем в контрольном варианте; ПМК – в 1,2 раза выше; СМК-П – в 1,1 раза выше. Таким образом, чем больше гидрофобных функциональных групп в полимерной цепи, тем менее выражена тенденция стабилизирующего действия поликислот.

Обращает на себя внимание синергизм стабилизирующего действия смесей поликислот: в присутствии смесей ПАК с ПМК и СМК-П (соотношение полимеров в смеси 1 : 1) оптическая плотность через 3 ч была в 1,7 раза выше по сравнению с дисперсией без добавок. Оптическая плотность дисперсии при введении смеси ПАК с СМК-П с низким содержанием гидрофобного компонента (соотношение полимеров 9 : 1) была в 2 раза выше по сравнению с дисперсией без добавок; в 1,4 раза по сравнению с ПАК и в 1,8 раза по сравнению с СМК-П.

Синергизм стабилизирующего действия смеси поликислот с различной гидрофобностью можно объяснить механизмом стерической стабилизации коллоидных дисперсных систем, который основан на отличии в адсорбции полимеров, имеющих различное соотношение гидрофильных и гидрофобных групп. Как правило, полимер, имеющий большее количество гидрофобных групп, выступает в роли так называемого якорного полимера и адсорбируется на поверхности коллоидной частички. В свою очередь, полимер с более высокой долей гидрофильных групп взаимодействует с якорным полимером и служит стабилизирующим фрагментом комплекса полимер-коллоидная частица [14–16].

Как видно из таблицы, в смешанной дисперсии содержание частиц с размером 20–40 мкм практически не зависит от гидрофобности поликислот. Некоторое увеличение доли крупных частиц при использовании СМК-П может быть обусловлено флокулирующим действием полимера. При введении смеси полимеров содержание мелких частиц резко возрастает по сравнению с системами, содержащими полимеры по отдельности.

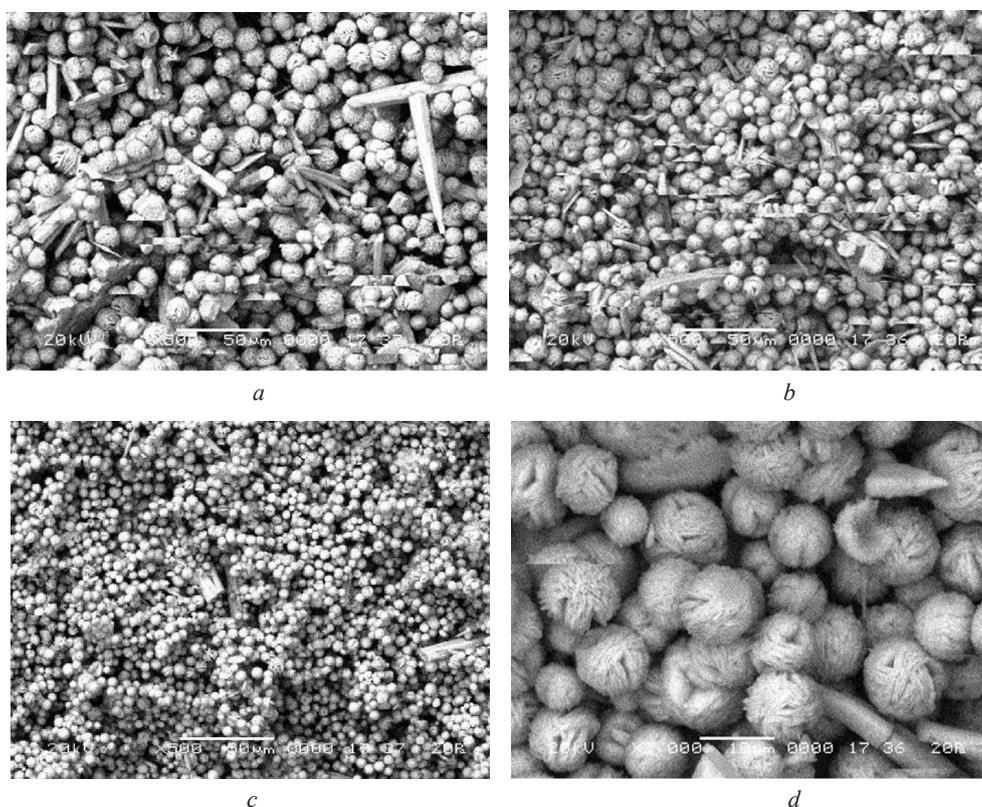


Рис. 2. Фотографии (*a–c* увеличение 500 раз; *d* – 2000 раз) карбонатов в присутствии смеси полимеров: ПАК с ПМК (*a*); ПАК с СМК-П (*b–d*) с соотношением компонентов 1 : 1 (*a, b*) и 9 : 1 (*c, d*)

Fig. 2. Photos (*a–c* $\times 500$; *d* – $\times 2000$) of carbonates in the presence of a polymer mixture: PAA with PMA (*a*); PAA with CMA-P (*b–d*) with the component ratio of 1 : 1 (*a, b*) and 9 : 1 (*c, d*)

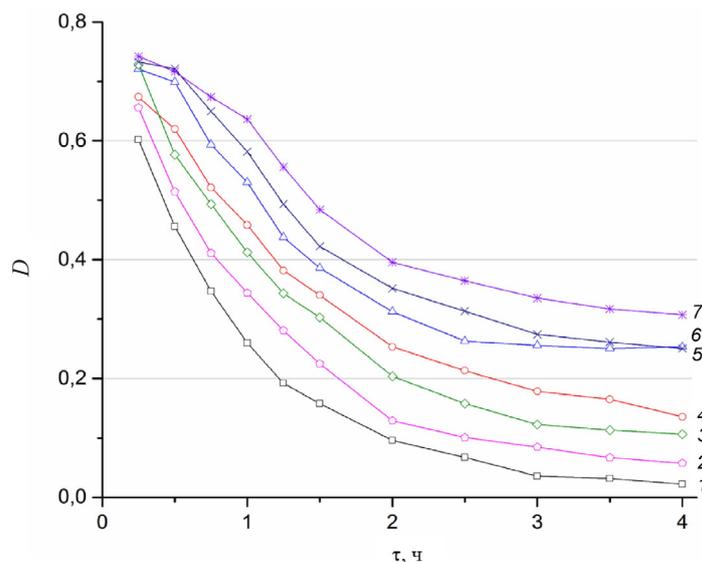


Рис. 3. Зависимость оптической плотности дисперсии карбонатов (D) от времени (τ) без добавок (1) и в присутствии полимеров (0,1 мг/г): СМК-П (2), ПМК (3), ПАК (4), смеси ПАК с ПМК (5), ПАК с СМК-П (6, 7) с соотношением компонентов 1 : 1 (5, 6) и 9 : 1 (7)

Fig. 3. Carbonates dispersion optical density (D) vs. time (τ) without additives (1) and in the presence of polymers (0.1 mg/g): СМА-Р (2), РМА (3), РАА (4), mixture of РАА with РМА (5), РАА with СМА-Р (6, 7) with the component ratio of 1 : 1 (5, 6) and 9 : 1 (7)

Эффект изменения размеров частиц проявляется в большей степени при увеличении доли гидрофобных групп в одном из компонентов смеси, а также при уменьшении содержания гидрофобного компонента. Полученные данные согласуются с результатами седиментационного анализа и, по-видимому, объясняются стабилизирующим действием адсорбционного слоя, сформированного молекулами на поверхности частиц.

В случае смешанной дисперсии карбонатов и каолина макромолекулы поликислот, содержащие заряженные функциональные группы и неполярные участки полимерной цепи, адсорбируются на поверхности как гидрофильных, так и гидрофобных частиц. Уменьшение размера частиц и увеличение кинетической устойчивости смешанной дисперсии в случае использования смеси ПАК с СМК-П с относительно низким содержанием последнего, как обсуждалось выше, может быть связано с «якорным» механизмом стабилизации коллоидной системы полимерами.

Способность поликислот взаимодействовать с ионами щелочноземельных металлов с образованием водорастворимых комплексов, а также адсорбироваться на поверхности зародышей кристаллизации солей жесткости, блокируя центры роста кристаллов, приводит к тому, что практически на любой поверхности, в том числе поверхности мембранных элементов, не происходит кристаллизация солей жесткости и образования осадков.

Кроме того, полимерные карбоксильные кислоты способны постепенно разрушать образовавшиеся осадки карбонатов, которые в виде мелких частиц легко удаляются циркулирующей

Размер частиц смешанной дисперсии карбонатов и каолина в присутствии поликислот

Size of particles with mixed dispersion of carbonates and kaolin in the presence of polyacids

Полимер (0,1 мг/л) Polymer (0.1 g/l)	Содержание (%) частиц с размером (мкм) Content (%) of particles with size (μm)		
	1–20	20–40	40–100
ПАК	24,8	69,4	5,8
ПМК	21,3	69,1	9,6
СМК-П	18,2	70,4	11,4
ПАК с ПМК (1 : 1)	39,3	57,5	3,2
ПАК с СМК-П (1 : 1)	48,4	48,7	2,9
ПАК с СМК-П (9 : 1)	65,1	32,4	2,5

водой [17]. Это явление объясняется не только химическими процессами взаимодействия компонентов системы, но и перестройкой кристаллической решетки карбоната кальция из кальцита в ватерит и арагонит, а также так называемым эффектом Ребиндера – расклинивающим действием молекул полимеров, адсорбированных в микро- и мезопорах отложений карбонатов. Уникальная способность карбоксилсодержащих полимеров ингибировать процесс кристаллизации карбоната кальция определяется геометрическим сходством карбонат- и карбоксилат-ионов.

Стабилизирующее действие поликислот в отношении дисперсий, содержащих осадки карбонатов и коллоидные частицы, обусловлено их способностью к взаимодействию с частицами различной природы благодаря наличию в полимерной цепи как заряженных, так и неполярных функциональных групп.

Заключение. Карбоксилсодержащие полимеры (полиакриловая и полиметакриловая кислоты, сополимер метакриловой кислоты с терпеном скипидара) с различным содержанием гидрофобных звеньев контролируют рост кристаллической фазы карбонатов кальция и магния. Молекулы поликислот замедляют процессы роста кристаллов и рекристаллизацию аморфной фазы в более устойчивые кристаллические формы, что приводит к изменению морфологии и структуры осадка карбонатов.

Поликарбоновые кислоты повышают коллоидную стабильность смешанной дисперсии карбонатов и каолина. За счет эффекта стабилизации светопропускание дисперсии уменьшается в присутствии поликислот в среднем в 1,1–1,4 раза, причем увеличение доли гидрофобных функциональных групп в полимерной цепи ослабляет стабилизирующее действие поликислот.

Отмечен синергизм стабилизирующего действия смесей поликислот с различной гидрофобностью: светопропускание уменьшается в 2 раза по сравнению с дисперсией без добавок и в 1,4–1,8 раза по сравнению с компонентами смеси.

На практике, в мембранных установках и в водооборотных системах, для которых характерны условия пересыщения по осадкообразующим ионам, наличие центров кристаллизации и недостаточная турбулизация потока, поликислоты ингибируют рост кристаллов и образование осадка на поверхности мембран или теплопередающих стенках оборудования, а также повышают седиментационную устойчивость дисперсии, что препятствует образованию плотного слоя из мелких кристаллов и частиц.

Список использованных источников

1. Hawe, M. Acrylic Polymers as Rheology Modifiers for Water-based Systems / M. Hawe // Handbook of Industrial Water Soluble Polymers. – 2007. – P. 32–72. <https://doi.org/10.1002/9780470988701.ch3>
2. Li, Q. Study on the molecular behavior of hydrophobically modified poly(acrylic acid) in aqueous solution and its emulsion-stabilizing capacity / Q. Li, R. Yuan, Y. Li // Journal of Applied Polymer Science. – 2013. – Vol. 128, N 1. – P. 206–215. <https://doi.org/10.1002/app.38169>
3. Rubinstein, M. Polyelectrolytes in biology and soft matter / M. Rubinstein, G. A. Papoian // Soft Matter. – 2012. – Vol. 8, N 36. – P. 9265–9267. <https://doi.org/10.1039/c2sm90104h>
4. Полиакриловая кислота и композиции на ее основе для ингибирования осадкообразования в водооборотных системах / И. В. Шестак [и др.] // Журн. прикладной химии. – 2009. – Т. 82, № 10. – С. 1742–1745.
5. Huang, S.-C. Effect of Molecular Weights of Poly(acrylic acid) on Crystallization of Calcium Carbonate by the Delayed Addition Method / S.-C. Huang, K. Naka, Y. Chujo // Polym. J. – 2008. – Vol. 40, N 2. – P. 154–162. <https://doi.org/10.1295/polymj.pj2007162>
6. Adsorption mechanism and dispersion efficiency of three anionic additives [poly(acrylic acid), poly(styrene sulfonate) and HEDP] on zinc oxide / C. Dange [et al.] // Journal of Colloid and Interface Science. – 2007. – Vol. 315, N 1. – P. 107–115. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2007.03.068>
7. Taylor, J. J. Adsorption of sodium polyacrylate in high solids loading calcium carbonate slurries / J. J. Taylor, W. M. Sigmund // Journal of Colloid and Interface Science. – 2010. – Vol. 341, N 2. – P. 298–302. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2009.09.048>
8. Торопцева, А. М. Лабораторный практикум по химии и технологии высокомолекулярных соединений / А. М. Торопцева, В. М. Бондаренко, К. В. Белгородская. – Л., 1972. – 415 с.
9. Массовая кристаллизация в неорганических системах / Т. А. Ларичев [и др.]. – Кемерово, 2006. – 176 с.
10. Шубников, А. В. Избранные труды по кристаллографии / А. В. Шубников. – М., 1975. – 551 с.
11. Oriented Nanocrystal Mosaic in Monodispersed CaCO₃ Microspheres with Functional Organic Molecules / H. Imai [et al.] // Cryst. Growth Des. – 2012. – Vol. 12, N 2. – P. 876–882. <https://doi.org/10.1021/cg201301x>
12. Чаусов, Ф. Ф. Влияние кристаллической структуры солей на эффективность ингибирования их кристаллизации органофосфонатами / Ф. Ф. Чаусов // Химия. – 2008. – Т. 51, № 5. – С. 63–67.
13. Дормешкин, О. Б. Метод оценки эффективности действия реагентов-ингибиторов накипеобразования / О. Б. Дормешкин, А. Д. Воробьев, Д. В. Чередниченко // Труды БГТУ. – 2013. – № 3. – С. 67–70.
14. Неппер, Д. Стабилизация коллоидных дисперсий полимерами: пер. с англ. / Д. Неппер. – М., 1986. – 487 с.
15. Electrosteric stabilization of colloidal dispersions / G. Fritz [et al.] // Langmuir. – 2002. – Vol. 18, N 16. – P. 6381–6390. <https://doi.org/10.1021/la015734j>

16. Zhang, J. Progress of nanocrystalline growth kinetics based on oriented attachment / J. Zhang, F. Huang, Z. Lin // *Nanoscale*. – 2010. – Vol. 2, N 1. – P. 18–34. <https://doi.org/10.1039/b9nr00047j>

17. Mineral scales and deposits: scientific and technological approaches / eds. by Z. Amjad, K. D. Demadis. – Elsevier, 2015. – 758 p. <https://doi.org/10.1016/c2012-0-07278-x>

References

1. Hawe M. Acrylic Polymers as Rheology Modifiers for Water-based Systems. *Handbook of Industrial Water Soluble Polymers*, 2007, pp. 32–72. <https://doi.org/10.1002/9780470988701.ch3>
2. Li Q., Yuan R., Li Y. Study on the molecular behavior of hydrophobically modified poly(acrylic acid) in aqueous solution and its emulsion-stabilizing capacity. *Journal of Applied Polymer Science*, 2013, vol. 128, no. 1, pp. 206–215. <https://doi.org/10.1002/app.38169>
3. Rubinstein M., Pappas G. A. Polyelectrolytes in biology and soft matter. *Soft Matter*, 2012, vol. 8, no. 36, pp. 9265–9267. <https://doi.org/10.1039/c2sm90104h>
4. Shestak I. V., Vorob'eva E. V., Basalyga I. I., Krut'ko N. P., Vorob'ev A. D. Polyacrylic acid and formulations based on it as inhibitors of deposit formation in water-recycling systems. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2009, vol. 82, no. 10. pp. 1894–1897. <https://doi.org/10.1134/s1070427209100280>
5. Huang S.-C., Naka K., Chujo Y. Effect of Molecular Weights of Poly(acrylic acid) on Crystallization of Calcium Carbonate by the Delayed Addition Method. *Polymer Journal*, 2008, vol. 40, no. 2, pp. 154–162. <https://doi.org/10.1295/polymj.pj2007162>
6. Dange C., Phan T. N. T., André V., Rieger J., Persello J., Foissy A. Adsorption mechanism and dispersion efficiency of three anionic additives [poly(acrylic acid), poly(styrene sulfonate) and HEDP] on zinc oxide. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2007, vol. 315, no. 1, pp. 107–115. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2007.03.068>
7. Taylor J. J., Sigmund W. M. Adsorption of sodium polyacrylate in high solids loading calcium carbonate slurries. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2010, vol. 341, no. 2, pp. 298–302. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2009.09.048>
8. Toroptseva A. M., Bondarenko V. M., Belogorodskaya K. V. *Laboratory Workshop on Chemistry and Technology of Macromolecular Compounds*. Leningrad, 1972. 415 p. (in Russian).
9. Laritchev T. A., Sotnikova L. V., Sechkarev B. A., Breslav Y. A., Utekhin A. N. *Bulk Crystallization in Inorganic Systems*. Kemerovo, 2006. 176 p. (in Russian).
10. Shubnikov A. V. *Selected works on crystallography*. Moscow, 1975. 551 p. (in Russian).
11. Imai H., Tochimoto N., Nishino Y., Takezawa Y., Oaki Y. Oriented Nanocrystal Mosaic in Monodispersed CaCO₃ Microspheres with Functional Organic Molecules. *Crystal Growth and Design*, 2012, vol. 12, no. 2, pp. 876–882. <https://doi.org/10.1021/cg201301x>
12. Chausov F. F. Influence of the Crystal Structure of Salts on the Efficiency of Inhibition of Their Crystallization by Organophosphonates. *Chemistry*, 2008, no. 5, pp. 63–67 (in Russian).
13. Dormeshkin O. B., Vorobiov A. D., Cherednichenko D. V. Evaluation method of scaling inhibitors action effectiveness. *Trudy BNTU* [Proceedings of BSTU], 2013, no. 3, pp. 67–70 (in Russian).
14. Nepper D. *Stabilization of colloidal dispersions by polymers*. London, 1984.
15. Fritz G., Schädler V., Willenbacher N., Wagner N. J. Electrosteric stabilization of colloidal dispersions. *Langmuir*, 2002, vol. 18, no. 16, pp. 6381–6390. <https://doi.org/10.1021/la015734j>
16. Zhang J., Huang F., Lin Z. Progress of nanocrystalline growth kinetics based on oriented attachment. *Nanoscale*, 2010, vol. 2, no. 1, pp. 18–34. <https://doi.org/10.1039/b9nr00047j>
17. Amjad Z., Demadis D., eds. *Mineral scales and deposits: scientific and technological approaches*. Elsevier, 2015. 758 p. <https://doi.org/10.1016/c2012-0-07278-x>

Информация об авторах

Воробьев Артем Дмитриевич – канд. хим. наук, заведующий лабораторией. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: pdvc@tut.by.

Бильдюкевич Александр Викторович – академик, д-р хим. наук, профессор, директор. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: uf@ifoch.bas-net.by.

Воробьева Елена Викторовна – д-р хим. наук, профессор, заведующий лабораторией. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: evorobieva@igic.bas-net.by.

Буча Светлана Васильевна – науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: bucha1003@gmail.com.

Астахова Марина Александровна – науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: manya88ama@mail.ru.

Information about the authors

Vorobiev Artem D. – Ph. D. (Chemistry), Head of the Laboratory. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pdvc@tut.by.

Bildyukevich Alexander V. – Academician, D. Sc. (Chemistry), Professor, Director. Institute of Physical and Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: uf@ifoch.bas-net.by.

Vorobieva Elena V. – D. Sc. (Chemistry), Professor, Head of the Laboratory. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: evorobieva@igic.bas-net.by.

Bucha Svetlana V. – Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bucha1003@gmail.com.

Astakhova Marina A. – Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: manya88ama@mail.ru.