

УДК: 544.421.3

DOI:10.17072/2223-1838-2021-3-175-183

П. К. Мельникова¹, Н. С. Кистанова¹, О. С. Кудряшова²¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия,²Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова, Пермь, Россия**ВЛИЯНИЕ НАТРИЕВОЙ СОЛИ КАРБОКСИМЕТИЛЦЕЛЛЮЛОЗЫ И ХЛОРИДА НАТРИЯ НА ОСАЖДЕНИЕ ДИГИДРАТА СУЛЬФАТА КАЛЬЦИЯ**

Исследовано влияние ингибитора кристаллизации – натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы со степенью полимеризации 1000 (КМЦ-1000) на осаждение сульфата кальция из его пересыщенных растворов, содержащих 0,7 и 1,5 моль/л хлорида натрия, при 25 °С. Эффективность ингибирования КМЦ-1000 установлена по результатам комплексонометрического титрования кальция в процессе спонтанной кристаллизации из 0,15 моль/л растворов сульфата кальция. Обнаружен синергетический эффект при совместном присутствии КМЦ-1000 и NaCl. Индукционный период кристаллизации дигидрата сульфата кальция из растворов, содержащих 0,5 г/л КМЦ-1000 и 0,7 моль/л хлорида натрия, увеличивается от 100 (без NaCl) до 630 мин. При концентрации 0,1 г/л КМЦ-1000 и 0,7 и 1,5 моль/л хлорида натрия 0,15 моль/л растворы сульфата кальция стабильны в течение 60 и 32 мин соответственно. Методом рентгенофазового анализа подтверждено, что сульфат кальция осаждается в форме дигидрата.

Ключевые слова: сульфат кальция; гипс; ингибиторы кристаллизации; натриевая соль карбоксиметилцеллюлозы

Поступила в редакцию 01.09.2021; принята к публикации 15.09.2021

P.K. Melnikova¹, N.S. Kistanova¹, O.S. Kudryashova²¹Perm State University, Perm, Russia²Perm State Agrarian-Technological University, Perm, Russia**THE INFLUENCE OF SODIUM CARBOXYMETHYLCELLULOSE AND SODIUM CHLORIDE ON THE PRECIPITATION OF CALCIUM SULFATE DIHYDRATE**

The inhibition of gypsum was investigated at 25 °C in aqueous 0,7 and 1,5 mol/l NaCl solutions by sodium carboxymethylcellulose (CMC-1000, with the degree of polymerization of 1000 units). The efficiency of inhibition was estimated from measurements of the calcium concentration in the supersaturated calcium sulfate solutions (0,15 mol/l) during the precipitation process by the standard procedure of complexometric titration. It was observed that the presence of NaCl exhibits synergistic effect on the performance of CMC-1000. In the presence of CMC-1000 at 0,5 g/l inhibitor concentration and sodium chloride at 0,7 mol/l concentration induction time, preceding the formation of the gypsum, increases from 100 (without NaCl) to 630 min. Induction times at 0,1 g/l CMC-1000 and sodium chloride at 0,7 and 1,5 mol/l concentrations are 60 and 32 min respectively. The results of X-ray powder diffraction indicated that dihydrate calcium sulfate and sodium chloride present in solid phase.

Keywords: calcium sulfate, gypsum, inhibitors of crystallization, sodium carboxymethylcellulose

Received 01.09.2021; accepted 15.09.2021

© Мельникова П.К., Кистанова Н.С., Кудряшова О.С., 2021



Данная статья распространяется на условиях лицензии
Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная

В природе известны процессы, приводящие к герметизации пористых горных пород, трещин и стыков грунтовых образований [1–4]. Осаждение карбоната кальция, гипса обеспечивает стабильное уплотнение в течение длительного времени. Копирование природных процессов для направленного снижения проницаемости пористых водоносных горизонтов может быть решением ряда экологических проблем. Новая технология, основанная на формировании искусственных водонепроницаемых барьеров, позволит уменьшить или остановить проникновение морской воды в прибрежных районах, снизить уровень грунтовых вод при строительстве фундаментов, туннелей, при разработке карьеров, строительстве резервуаров подземных вод, а также восстановить загрязненные территории путем иммобилизации или инкапсуляции тяжелых металлов [5–7]. Тампонажные растворы на основе цемента или полимеров заполняют пустоты, трещины в горных породах и последующий процесс схватывания приводит к уплотнению грунта. Напротив, при закачивании пересыщенного раствора малорастворимой соли в скважину взаимодействие его с материалом породы приводит к деактивации ингибитора. Растворы становятся нестабильными, происходит спонтанная кристаллизация с послойной герметизацией во всем объеме порового пространства.

На процесс кристаллизации сульфата кальция из растворов существенное влияние оказывает степень пересыщения [8–10], температура [11–13], ионная сила раствора [14–16], а также природа и концентрация ингибитора [17–21]. Ингибиторы не увеличивают растворимость соли, но влияют на кинетику кристал-

лизации, процесс зародышеобразования и рост кристаллов. Молекулы полимера блокируют центры роста кристаллов, предотвращая таким образом спонтанную кристаллизацию соли. В настоящее время отсутствуют какие-либо убедительные представления о механизме ингибирования процесса кристаллизации. Многочисленные исследования показывают, что наиболее эффективными ингибиторами кристаллизации гипса являются полимерные молекулы [22–28], содержащие карбоксильные группы, фосфорсодержащие полиэфиры. В работах [27–29] показано, что присутствие ионов магния, кадмия, железа, хрома способствует торможению реакции осаждения дигидрата сульфата кальция. Обнаружено, что присутствие хлорида натрия в растворах усиливает ингибирующее действие неорганических и органических добавок.

В настоящей работе исследовано влияние натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы и хлорида натрия на осаждение гипса из пересыщенных растворов сульфата кальция при 25°C.

Объекты и методы исследования

В работе использованы сульфат натрия марки «хч» и безводный хлорид кальция марки «ч», дистиллированная вода $n_D^{25} = 1,3325$, натриевая соль карбоксиметилцеллюлозы со степенью полимеризации 1000 (КМЦ-1000).

Содержание ионов кальция в растворе определяли титриметрическим методом с ЭДТА в присутствии индикатора эриохрома черного Т в хлоридно-аммиачном буферном растворе с $pH = 10$ [30]. Для стандартизации ЭДТА использован 0,05 моль/л раствор хлорида цинка, приготовленный растворением точной навески

металлического цинка в разбавленной хлороводородной кислоте [31].

Пересыщенные растворы сульфата кальция готовили смешиванием равных объемов (50 мл) эквимольных (0,3 моль/л) растворов хлорида кальция и сульфата натрия. КМЦ-1000 (0,1 и 0,5 г/л) и NaCl (0,7 и 1,5 моль/л) предварительно добавляли к раствору сульфата натрия. Исследование проводили при 25°C, температуру исходных и рабочего растворов поддерживали с точностью ($\pm 0,1^\circ\text{C}$) с помощью циркуляторного термостата LOIPLT-300 с внешним охлаждением.

В процессе осаждения соли через определенные промежутки времени из колбы отбирали аликвоты объемом 2 мл и определяли содержание ионов кальция комплексометрическим методом. Момент начала кристаллизации регистрировали по снижению концентрации ионов кальция в растворе. На кривой осаждения дигидрата сульфата кальция (см. рисунок) горизонтальный участок соответствует периоду зародышеобразования. Постепенное снижение концентрации свободных ионов кальция указывает на рост сформировавшихся зародышей. Индукционный период кристаллизации ($\tau_{\text{инд.}}$) гипса устанавливали по наклону линейного участка кривой роста кристаллов. Состав кристаллизующейся твердой фазы определяли на дифрактометре D8 Advance ECO Bruker.

Результаты и их обсуждение

Исследовано влияние КМЦ-1000 и хлорида натрия на ингибирование процесса кристаллизации сульфата кальция из 0,15 моль/л растворов. Результаты исследования сведены в таблицу. Каждый эксперимент повторяли три раза. Для растворов, содержащих 0,5 г/л КМЦ-

1000, добавление хлорида натрия приводит к увеличению индукционного периода кристаллизации гипса в 6 раз со 100 минут (без NaCl) до 630 минут (при концентрации хлорида натрия 0,7 моль/л). В растворах с концентрации хлорида натрия 1,5 моль/л время удерживания ионов кальция в присутствии 0,5 г/л КМЦ-1000 превышает 12 часов. Для растворов, содержащих 0,1 г/л карбоксиметилцеллюлозы зависимость индукционного периода кристаллизации от содержания хлорида натрия слабо выражена, время удерживания ионов кальция в растворе 60 мин отвечает концентрации хлорида натрия 0,7 моль/л.

Таблица

Влияние хлорида натрия и КМЦ-1000 на индукционный период кристаллизации дигидрата сульфата кальция*

С(КМЦ-1000), г/л	С(NaCl), моль/л	$\tau_{\text{инд.}}$, мин
0,1	-	< 15
0,1	0,7	60
0,1	1,5	32
0,5	-	100
0,5	0,7	630
0,5	1,5	>720

*концентрация CaSO_4 в растворе 0,15 моль/л

На рисунке представлены кривые спонтанной кристаллизации гипса из пересыщенных растворов, содержащих 20,4 г/л сульфата кальция, КМЦ-1000 и хлорид натрия. Как видно из графиков, КМЦ-1000 замедляет не только скорость зародышеобразования (горизонтальный участок), но и скорость роста кристаллов. С увеличением концентрации ингибитора в 5 раз угол наклона прямолинейного участка (кривой роста кристаллов) уменьшается.

Обнаружен синергетический эффект, который наблюдается в растворах сульфата каль-

ция при совместном присутствии карбоксиметилцеллюлозы и хлорида натрия. Эффективность КМЦ-1000 как ингибитора кристаллизации можно объяснить наличием в полимерной цепи большего числа карбоксильных групп, которые способны не только связывать ионы кальция в комплексы, но и адсорбироваться на поверхности зародышей кристаллов, блокируя их дальнейший рост. Присутствие хлорида на-

трия в растворе увеличивает до некоторого предельного значения растворимость сульфата кальция за счет снижения активности ионов кальция и сульфат-ионов в растворе.

В составе осадка, образующегося в процессе спонтанной кристаллизации, методом рентгенофазового анализа, определен дигидрат сульфата кальция (гипс) с примесью хлорида натрия.

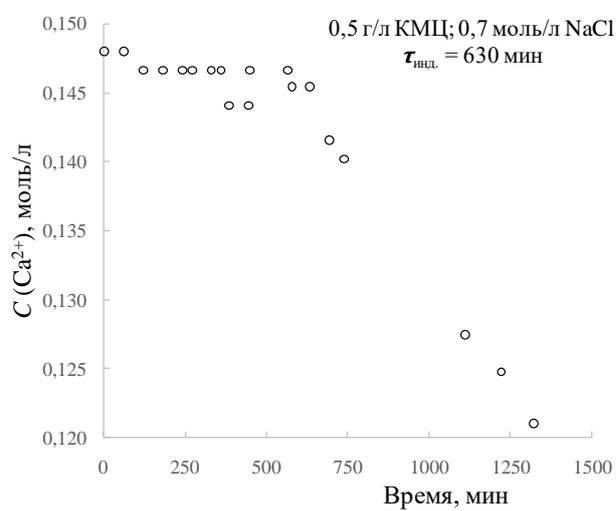
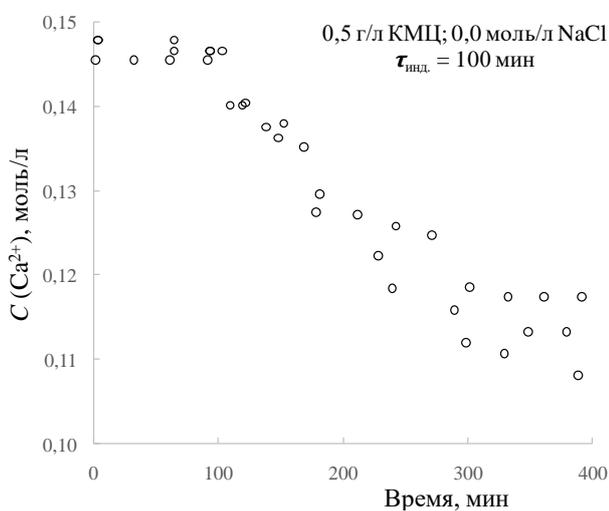
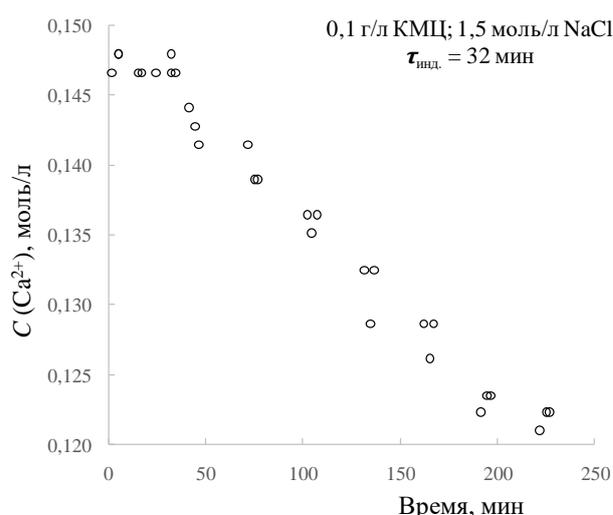
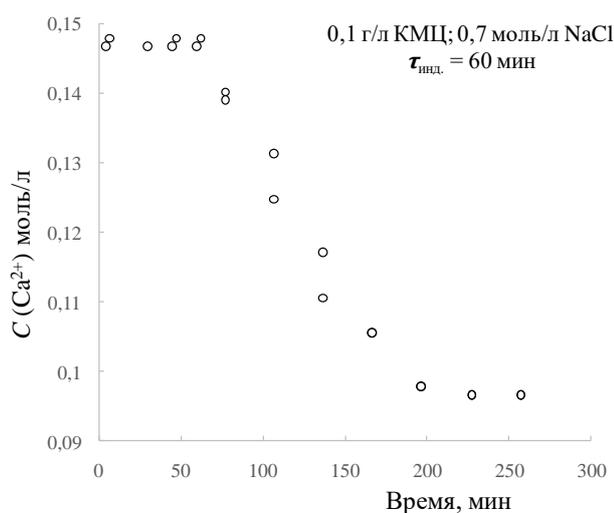


Рис. Спонтанная кристаллизация дигидрата сульфата кальция в присутствии ингибитора кристаллизации КМЦ-1000 и хлорида натрия

Таким образом, выполненные исследования показали, что КМЦ-1000 является достаточно хорошим ингибитором кристаллизации сульфата кальция. Несомненным преимуществом

является то, что эффективность процесса ингибирования возрастает в растворах, содержащих хлорид натрия. Это позволяет использовать пересыщенные растворы сульфата каль-

ция при тампонировании пород в районах калийных рудников.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № АА-АА-А20-120081990070-9).

Список литературы

1. *Перельман А.И.* Геохимия. М.: Высшая школа, 1989. 582 с.
2. *Баюрова Ю.Л., Нестеров Д.П., Корнева Е.А., Светлов А.В., Макаров Д.В., Маслобоев В.А.* Искусственные геохимические барьеры для решения экологических и технологических задач // Вестник МГТУ. 2013. Т. 16, №3. С. 536–541.
3. *Максимович Н.Г.* Очистка сточных вод россыпных месторождений с помощью механических геохимических барьеров // Горный журнал. 2007. № 4. С. 77–78.
4. *Каймин Е.П., Захарова Е.В., Константинова Л.И., Зубков А.А., Данилов В.В.* Использование кремневой кислоты для создания противотрационной завесы в песчаном горизонте // Геология. 2007. № 2. С. 137–142.
5. *Ziegenbalg G.* Grouting with mineral-forming solutions – a new technique for sealing porous and fractured rock by directed crystallization processes // *Developments in Water Science. Underground Injection Science and Technology.* 2005. V. 52. P. 341–358.
6. *Chen T., Chen P., Montgomerie H., Hagen T.* New product development for oil field application // *Mineral Scales and Deposits. Scientific and Technological Approaches.* Amsterdam, 2015. P. 223–238.
7. *Ziegenbalg G.* Directed and controlled crystallisation of slightly soluble Minerals – a new technology to seal water inflows and to immobilize contaminants // 10th International Mine Water Association Congress. Karlsbad, Czech Republic. P. 55–58.
8. *Freyer D., Voigt W.* Crystallization and phase stability of CaSO₄ and CaSO₄ – based salts // *Monatshefte für Chemie.* 2003. Vol. 134. P. 693–719.
9. *Fu H., Guan B., Jiang G., Yates M.Z., Wu Z.* Effect of supersaturation on competitive nucleation of CaSO₄ phases in a concentrated CaCl₂ solution // *Crystal Growth & Design.* 2012. V. 12. P. 1388–1394.
10. *Ziegenheim Sz., Peintler G., Palinko I., Sipos P.* The kinetics of the precipitation of gypsum, CaSO₄·2H₂O, over a wide range of reactant concentration // *Reaction kinetics, mechanisms and catalysis.* 2020. V. 131. P. 75–88.
11. *Lancia A., Musmarra D., Prisciandaro M.* Measuring induction period for calcium sulfate dihydrate precipitation // *AIChE Journal.* 1999. V. 45. P. 390–397.
12. *Klepetsanis P.G., Dalas E., Koutsoukos G.* Role of temperature in the spontaneous precipitation of calcium sulfate dihydrate // *Langmuir.* 1999. V. 15. P. 1534–1540.
13. *Bock E.* On the solubility of anhydrous calcium sulphate and of gypsum in concentrated solutions of sodium chloride at 25 °C, 30°C, 40 °C, and 50°C // *Canadian journal of chemistry.* 1961. V. 39. P. 1746–1751.
14. *Sheikholeslami R., Ong H.W.K.* Kinetics and thermodynamics of calcium carbonate and cal-

- cium sulfate at salinities up to 1.5 M // Desalination. 2003. V. 157. P. 217–234.
15. *Hamdona S.K., Hadad O.A.* Influence of additives on the precipitation of gypsum in sodium chloride solutions // Desalination. 2008. V. 228. P. 277–286.
16. *He S., Oddo J.E., Tomson M.B.* The inhibition of gypsum and barite nucleation in NaCl brines at temperatures from 25 to 90°C // Applied Geochemistry. 1994. V. 9. P. 561–567.
17. *McCartney E.R., Alexander A.E.* The effect of additives upon the process of crystallization. I. Crystallization of calcium sulfate // Journal of Colloid Science. 1958. V. 13. P. 383–396.
18. *Weijnen M.P.C., Rosmalen G.M.* The influence of various polyelectrolytes on the precipitation of gypsum // Desalination. 1985. V. 54. P. 239–261.
19. *Zhao Y., Jia L., Liu K., Gao P., Ge H., Fu L.* Inhibition of calcium sulfate scale by poly (citric acid) // Desalination. 2016. Vol. 392. P. 1–7.
20. *Chauhan K., Kumar R., Kumar M., Sharma P., Chauhan G.S.* Modified pectin-based polymers as green antiscalants for calcium inhibition // Desalination. 2012. V. 305. P. 31–37.
21. *Hasson D., Shemer H., Sher A.* State of the art of friendly «green» scale control inhibitors: a review article // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2011. V. 50. P. 7601–7607.
22. *Lioliou M.G., Paraskeva C.A., Koutsoukos P.G., Payatakes A.C.* Calcium sulfate precipitation in the presence of water-soluble polymers // Journal of Colloid and Interface Science. 2006. V. 303. P. 164–170.
23. *Amjad Z., Landgraf R.T., Pen J.L.* Calcium sulfatedihydrate (gypsum) scale inhibition by PAA, PAPEMP, and PAA/PAPEMP blend // International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. 2014. V. 3. P. 35–47.
24. *Кистанова Н.С., Леонтьев П.Ю., Кудряшова О.С.* Влияние натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы и полиакриламида на осаждение сульфата кальция. // Вестник Пермского университета. Серия Химия. 2019. Т. 9, № 3. С. 203–211.
25. *Rabizadeh T., Peacock C.L., Benning L.G.* Carboxylic acids: effective inhibitors for calcium sulfate precipitation? // Mineralogical Magazine. 2014. V. 78(6). P. 1465–1472.
26. *Akyol E., Öner M., Barouda E., Demadis K.D.* Systematic structural determinants of the effects of tetraphosphonates on gypsum crystallization // Crystal Growth & Design. 2009. V. 9. P. 5145–5154.
27. *Ahmed S.B., Tlili M.M., Amami M., Amor M.B.* Gypsum Precipitation Kinetics and solubility in the NaCl–MgCl₂–CaSO₄–H₂O system // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2014. V. 53. P. 9554–9560.
28. *Hamdona S.K., Nessim R.B., Hamza S.M.* Spontaneous precipitation of calcium sulphate dihydrate in the presence of some metal ions // Desalination. 1993. V. 94. P. 69–80.
29. *Driessche A.E.S., Kellermeier M., Benning L.G., Gebauer D.* Calcium sulfate precipitation throughout its phase diagram. New Perspectives on Mineral Nucleation and Growth: From Solution Precursors to Solid Materials. Springer. 2017. P. 227–256.
30. *Шварценбах Г., Флашка Г.* Комплексонометрическое титрование. М.: Химия, 1970.
31. *Рабинович В.А., Хавин З.Я.* Краткий химический справочник. 2-е изд. испр. и доп. Л.: Химия, 1978.

References

1. Perelman, A.I. (1989), *Geokhimiya* [Geochemistry], Vyshcha Shkola, Moscow, Russia. (In Russ.).
2. Bayurova, Yu.L., Nesterov, D.P., Korneva, E.A., Svetlov, A.V., Makarov, D.V. and Masloboyev, V.A. (2013), "Iskusstvennyye geokhimicheskiye baryery dlya resheniya ekologicheskikh i tekhnologicheskikh zadach", *Vestnik MGTU*, vol. 16, no. 3, pp. 536–541. (In Russ.).
3. Maksimovich, N.G. (2007), "Ochistka stochnykh vod rossypanykh mestorozhdeniy s pomoshchyu mekhanicheskikh geokhimicheskikh baryerov", *Gornyy Zhurnal*, no. 4, pp. 77–78. (In Russ.).
4. Kaymin, E.P., Zakharova, E.V., Konstantinova, L.I., Zubkov, A.A., and Danilov, V.V. (2007), "Ispolzovaniyekremnevoykislotydlyasozdaniyaprotivofiltratsionnoyzavesy v peschanomgorizonte", *Geologiya*, no. 2, pp. 137–142. (In Russ.).
5. Ziegenbalg, G. (2005), "Grouting with mineral-forming solutions – a new technique for sealing porous and fractured rock by directed crystallization processes", in Tsang, C. and Apps, J.A. (ed.), *Developments in Water Science. Underground Injection Science and Technology*, Elsevier, Amsterdam, Netherlands, pp. 341–358.
6. Chen, T., Chen, P., Montgomerie, H. and Hagen, T. (2015), "New product development for oil field application", in Amjad, Z. and Demadis, K.D. (ed.), *Mineral Scales and Deposits. Scientific and Technological Approaches*, Amsterdam, Netherlands, pp. 223–238.
7. Ziegenbalg, G. (2008), "Directed and controlled crystallisation of slightly soluble Minerals – a new technology to seal water inflows and to immobilize contaminants", *Proceedings of the 10th International Mine Water Association Congress*, Karlsbad, Czech Republic. pp. 55–58.
8. Freyer, D. and Voigt, W. (2003), "Crystallization and phase stability of CaSO_4 and CaSO_4 – based salts", *Monatshefte für Chemie*, vol. 134, pp. 693–719.
9. Fu, H., Guan, B., Jiang, G., Yates, M.Z. and Wu, Z. (2012), "Effect of supersaturation on competitive nucleation of CaSO_4 phases in a concentrated CaCl_2 solution", *Crystal Growth & Design*, vol. 12, pp. 1388–1394.
10. Ziegenheim, Sz., Peintler, G., Palinko, I. and Sipos, P. (2020), "The kinetics of the precipitation of gypsum, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, over a wide range of reactant concentration", *Reaction kinetics, mechanisms and catalysis*, vol. 131, pp. 75–88.
11. Lancia, A., Musmarra, D. and Prisciandaro, M. (1999), "Measuring induction period for calcium sulfate dihydrate precipitation", *AIChE Journal*, vol. 45, pp. 390–397.
12. Klepetsanis, P.G., Dalas, E. and Koutsoukos G. (1999), "Role of temperature in the spontaneous precipitation of calcium sulfate dihydrate", *Langmuir*, vol. 15, pp. 1534–1540.
13. Bock, E. (1961), "On the solubility of anhydrous calcium sulphate and of gypsum in concentrated solutions of sodium chloride at 25°C, 30°C, 40°C, and 50°C", *Canadian journal of chemistry*, vol. 39, pp. 1746–1751.
14. Sheikholeslami, R. and Ong, H.W.K. (2003), "Kinetics and thermodynamics of calcium carbonate and calcium sulfate at salinities up to 1.5 M", *Desalination*, vol. 157, pp. 217–234.

15. Hamdona, S.K. and Hadad, O.A. (2008), "Influence of additives on the precipitation of gypsum in sodium chloride solutions", *Desalination*, vol. 228, pp. 277–286.
16. He, S., Oddo, J.E. and Tomson, M.B. (1994), "The inhibition of gypsum and barite nucleation in NaCl brines at temperatures from 25 to 90 °C", *Applied Geochemistry*, vol. 9, pp. 561–567.
17. McCartney, E.R. and Alexander, A.E. (1958), "The effect of additives upon the process of crystallization. I. Crystallization of calcium sulfate", *Journal of Colloid Science*, vol. 13, pp. 383–396.
18. Weijnen, M.P.C. and Rosmalen, G.M. (1985), "The influence of various polyelectrolytes on the precipitation of gypsum", *Desalination*, vol. 54, pp. 239–261.
19. Zhao, Y., Jia, L., Liu, K., Gao, P., Ge, H. and Fu, L. (2016), "Inhibition of calcium sulfate scale by poly (citric acid)", *Desalination*, vol. 392, pp. 1–7.
20. Chauhan, K., Kumar, R., Kumar, M., Sharma, P. and Chauhan, G.S. (2012), "Modified pectin-based polymers as green antiscalants for calcium inhibition", *Desalination*, vol. 305, pp. 31–37.
21. Hasson, D., Shemer, H. and Sher, A. (2011), "State of the art of friendly «green» scale control inhibitors: a review article", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 50, pp. 7601–7607.
22. Lioliou, M.G., Paraskeva, C.A., Koutsoukos, P.G. and Payatakes, A.C. (2006), "Calcium sulfate precipitation in the presence of water-soluble polymers", *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 303, pp. 164–170.
23. Amjad, Z., Landgraf, R.T. and Pen, J.L. (2014), "Calcium sulfatedihydrate (gypsum) scale inhibition by PAA, PAPEMP, and PAA/PAPEMP blend", *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, vol. 3, pp. 35–47.
24. Kistanova, N.S., Leontyev, P.Yu. and Kudryashova, O.S. (2019), "Vliianienatrievoi soli karboksimetilcellulozi i poliakrilamida na osajdenie sulfata kaltsiya", *Bulletin of Perm University. Chemistry*, vol. 9, no. 3, pp. 203–211. (In Russ.).
25. Rabizadeh, T., Peacock, C.L. and Benning, L.G. (2014), "Carboxylic acids: effective inhibitors for calcium sulfate precipitation?", *Mineralogical Magazine*, vol. 78(6), pp. 1465–1472.
26. Akyol, E., Öner, M., Barouda, E. and Demadis, K.D. (2009), "Systematic structural determinants of the effects of tetraphosphonates on gypsum crystallization", *Crystal Growth & Design*, vol. 9, pp. 5145–5154.
27. Ahmed, S.B., Tlili, M.M., Amami, M. and Amor, M.B. (2014), "Gypsum Precipitation Kinetics and solubility in the NaCl–MgCl₂–CaSO₄–H₂O system", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 53, pp. 9554–9560.
28. Hamdona, S.K., Nessim, R.B. and Hamza, S.M. (1993), "Spontaneous precipitation of calcium sulphate dihydrate in the presence of some metal ions", *Desalination*, vol. 94, pp. 69–80.
29. Driessche, A.E.S., Kellermeier, M., Benning, L.G. and Gebauer, D. (2017), "Calcium sulfate precipitation throughout its phase diagram", in Driessche, A.E.S., Kellermeier, M., Benning, L.G., Gebauer, D. (ed.), *New Perspectives on Mineral Nucleation and Growth: From Solu-*

tion Precursors to Solid Materials, Springer, Switzerland, pp. 227–256.

30. Shvarcenbah, G. and Flashka, G. (1970), *Kompleksonometricheskoe titrovaniye* [Complexometric titration], Himiya, Moscow. (In Russ.).

31. Rabinovich, V.A. and Havin, Z.Ya. (1991), *Kratkii himiechskii spravochnik* [Short Chemical Handbook]. Himiya, Leningrad. (In Russ.).

Об авторах

Полина Константиновна Мельникова, студент, кафедра неорганической химии, химической технологии и техносферной безопасности Пермский государственный национальный исследовательский университет 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15. natalya.kistanova@gmail.com

Наталья Сергеевна Кистанова, кандидат химических наук, доцент, кафедра неорганической химии, химической технологии и техносферной безопасности, Пермский государственный национальный исследовательский университет 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15. natalya.kistanova@gmail.com

Ольга Станиславовна Кудряшова, доктор химических наук, профессор, главный научный сотрудник, лаборатория биогеохимии техногенных ландшафтов, Естественнонаучный институт, Пермский государственный национальный исследовательский университет 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15. профессор, кафедра химии, Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова 614990, г. Пермь, ул. Петропавловская, 23. oskudr@psu.ru

About the authors

Polina K. Melnikova, Student, Department of Inorganic Chemistry, Chemical Technology and Technosphere Safety Perm State University. 15, Bukirev st., Perm, Russia, 614990 natalya.kistanova@gmail.com

Natalya S. Kistanova, Candidate of Chemistry Sciences, Associate professor, Department of Inorganic Chemistry, Chemical Technology and Technosphere Safety, Perm State University. 15, Bukirev st., Perm, Russia, 614990 natalya.kistanova@gmail.com

Olga S. Kudryashova, Doctor of Chemistry Sciences, Professor, Chief Researcher, Laboratory of Biogeochemistry of Technogenic Landscapes, Institute of Natural Sciences Perm State University. 15, Bukirev st., Perm, Russia, 614990. Professor, Department of Chemistry, Perm State Agro-Technological University. 23, Petropavlovskaya st., Perm, Russia, 614990 oskudr@psu.ru

Информация для цитирования:

Мельникова П.В., Кистанова Н.С., Кудряшова О.С. Влияние натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы и хлорида натрия на осаждение дигидрата сульфата кальция // Вестник Пермского университета. Серия «Химия». 2021. Т. 11, вып. 3. С. 175–183. DOI: 10.17072/2223-1838-2021-3-175-183.

Melnikova P.V., Kistanova N.S., Kudryashova O.S. *Vliyaniye natriyevoy soli karboksimitiltseulyulozy i khlorida natriya na osazhdeniye digidrata sul'fata kal'tsiya* [The influence of sodium carboxymethylcellulose and sodium chloride on the precipitation of calcium sulfate dihydrate], Bulletin of Perm University. Chemistry. 2021, vol. 11, no. 2, pp. 103–113. (In Russ.). DOI: 10.17072/2223-1838-2021-3-175-183.