

И. А. Почиталкина, А. Э. Коваленко

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АНТИСКАЛАНТОВ В ОТНОШЕНИИ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ СУЛЬФАТА КАЛЬЦИЯ

Ключевые слова: сульфат кальция, антискаланты, нуклеация, кристаллизация.

На примере четырех групп модельных растворов сульфата кальция четырехкратного пересыщения ($C(\text{CaSO}_4) = 0.0598$ моль/л) относительно равновесной концентрации ($C^*(\text{CaSO}_4) = 0.0145$ моль/л) с добавкой антискалантов с люминесцентной меткой исследован процесс образования осадка. Первая и вторая группы растворов содержали антискалант на основе полимера PAA с добавкой люминофора F1 и F2 (PAA-F1 и PAA-F2), третья группа – содержала антискалант на основе органофосфонатов HEDP с добавкой люминофора F (HEDP-F) и четвертая – антискалант на основе полиимидов PSI с добавкой люминофора NI (PSI-NI). Холостой раствор сульфата кальция четырехкратного пересыщения служил раствором сравнения. С помощью комплексонометрического и электрохимического методов анализа, основанных на различных физических принципах, получены кинетические зависимости $C(\text{CaSO}_4) = f(\tau)$, $\text{pH} = f(\tau)$, $\chi = f(\tau)$ при температурах 25 °C, 35 °C и 45 °C. Сопоставление кривых позволило сравнить эффективность антискалантов по продолжительности периода нуклеации. Установлено, что продолжительность периода нуклеации, оцениваемая кондуктометрическими методами анализа раствора почти в 2 раза больше периода нуклеации, оцениваемого комплексонометрическим методом анализа. Предположительно, это объясняется адгезией ингибитора с добавкой люминофора на датчиках, вызывающей погрешность измерения значений удельной электропроводности и pH, а, следовательно, и ошибочной интерпретации полученных данных. Показано, что в рекомендуемых производителями дозах наибольшей эффективностью обладают антискаланты первой и второй группы (PAA-F1 и PAA-F2), обеспечивающие стабильность растворов четырехкратного пересыщения свыше 91 дня при $T=25^\circ\text{C}$. Обнаружена термическая нестабильность люминофоров, приводящая к существенному снижению их эффективности и погрешности количественного анализа, что необходимо учитывать в каждом конкретном приложении. В целях рационального применения целесообразно снижение рекомендуемой производителями дозы антискалантов A1 и A2.

I. A. Pochitalkina, A. E. Kovalenko

STUDY OF THE EFFECTIVENESS OF ANTI-SCALANTS ON THE PROCESS OF CALCIUM SULFATE FORMATION

Key words: calcium sulfate, antiscalants, nucleation, crystallization.

The process of sediment formation was studied using four groups of model calcium sulfate solutions with fourfold supersaturation ($C(\text{CaSO}_4) = 0.0598$ mol/l) relative to the equilibrium concentration ($C^*(\text{CaSO}_4) = 0.0145$ mol/l) with the addition of antiscalants with a luminescent label as an example. The first and second groups of solutions contained an antiscalant based on the PAA polymer with the addition of phosphors F1 and F2 (PAA-F1 and PAA-F2), the third group contained an antiscalant based on HEDP organophosphonates with the addition of phosphor F (HEDP-F), and the fourth group contained an antiscalant based on PSI polyimides with the addition of phosphor NI (PSI-NI). A blank solution of calcium sulfate with fourfold supersaturation served as a comparison solution. Using complexometric and electrochemical methods of analysis based on different physical principles, kinetic dependences $C(\text{CaSO}_4) = f(\tau)$, $\text{pH} = f(\tau)$, $\chi = f(\tau)$ were obtained at temperatures of 25°C, 35°C and 45°C. Comparison of the curves allowed us to compare the efficiency of antiscalants by the duration of the nucleation period. It was found that the duration of the nucleation period estimated by conductometric methods of solution analysis is almost 2 times longer than the nucleation period estimated by the complexometric method of analysis. Presumably, this is explained by the adhesion of the inhibitor with the phosphor additive on the sensors, causing an error in measuring the values of specific electrical conductivity and pH, and, consequently, an erroneous interpretation of the data obtained. It has been shown that the antiscalants of the first and second groups (PAA-F1 and PAA-F2) are the most effective in the doses recommended by the manufacturers, ensuring the stability of solutions of fourfold supersaturation for over 91 days at $T=25^\circ\text{C}$. Thermal instability of luminophores has been detected, leading to a significant decrease in their effectiveness and quantitative analysis error, which must be taken into account in each specific application. For the purpose of rational use, it is advisable to reduce the dose of antiscalants A1 and A2 recommended by the manufacturers.

Применение антискалантов - ингибиторов процесса кристаллизации в технологии водоподготовки обеспечивает возможность контролирования образования осадка и минимизирования инкрустации оборудования [1,2]. В соответствии с общепринятой классификацией антискалантов (А) [3, 4], основанной на результатах систематических исследований аспектов процесса кристаллизации [5, 6], морфологии осадков [7], специфики антискалантов [8, 9] выделяют четыре типа последних, отличающихся не

только природой действующего вещества, но и механизмом.

Наиболее распространенные и хорошо изученные органофосфонаты [10] представляют собой первый тип антискалантов, содержащих аминотрис (метиленфосфоновая кислота) (АТМР), 1-гидроксиэтан-1,1-бис (фосфоновая кислота) (HEDP), 2-фосфонобутан-1,2,4-трикарбоновая кислота (PBTC), этилендиаминтетра (m-этиленфосфоновая кислота) (EDTPH) и т.д. [11]. Второй тип антискалантов представлен полимерами - полифосфатами (гексаметафосфат

(НМР), триполифосфатами (ТРР) и др.), полиимидами [12] (полисукцинимид (PSI [13]), полиакрилаты (РА)) [14], поликарбоксилатами (реагенты на основе полиакриловой кислоты (РАА) [15], полималеиновой (РМА), полиаспарагиновой (полиаспартат (PASP) [16]) и полиэпоксидной янтарной кислот (PESA) др.), а также поликарбоксисульфонатами (PCS) [17]. Антискаланты третьего типа имеют комбинированный состав и представлены смесью различных полимеров и органофосфонатов. «Зелёные» антискаланты четвертого типа - полисахариды (арабиногалактан, натриевая соль карбоксиметилцеллюлозы, гуаровая камедь, карбоксиметилинулин и другие), в т.ч. ингибиторы с флуоресцентной меткой (люминофоры) [18-20]. Использование флуоресцентной метки в составе ингибиторов для визуализации процесса образования устойчивого зародыша [21-23] и обоснования механизма кристаллизации [24-28] позволяет выделить их в отдельную пятую группу.

Выбор типа ингибитора и концентрации влияет на кинетические параметры системы, в которой протекает сложный механизм процесса кристаллизации, время отдельных стадий процесса, состав, структуру и морфологию образующегося осадка [29, 30].

При выборе ингибитора для конкретной системы руководствуются такими критериями, как эффективность [31], технико-экономическая целесообразность [32] и экологическая безопасность [33]. Определение минимальной эффективной концентрации антискаланта, обнаруживающей пороговый эффект, является важной практической задачей, позволяющей не только снизить материальные затраты на его приобретение, но и экологический след от его применения.

Для получения достоверных данных при исследовании сложных многокомпонентных систем $\text{CaSO}_4\text{-NaCl-H}_2\text{O-A}$ выполняют параллельный анализ жидкой и твердой фаз. В качестве методов исследования наряду со стандартным количественным анализом: гравиметрии, титриметрии, рН-метрии, кондуктометрии, комплексонометрии (ГОСТ 10398–2016) [34] применяют и инструментальные методы: микроскопии (оптической, просвечивающей и электронной), динамического рассеяния света, дифрактометрии и др.

На примере модельных растворов сульфата кальция различной степени пересыщения ($2X - 6X$) по отношению к равновесной концентрации CaSO_4 ($1,495 \cdot 10^{-3}$ моль/л), приготовленных на деионизированной воде [35] получены зависимости интенсивности поглощения падающего света от длины волны для корректной интерпретации результатов систематического эксперимента.

С помощью измерений параметров дисперсной фазы и дисперсионной среды в процессе кристаллизации сульфата кальция установлено наличие наночастиц – микропыли в диапазоне (<100) ÷ (>200), влияющей на увеличение скорости зарождения кристаллов гипса [36]. Фильтрация таких систем с помощью мембраны 200 нм способна снизить содержание микропримесей (>100 нм) на три порядка, до 10^3 ед./мл, однако более многочисленная нанодисперсия (<100 нм) остается в растворе [37] и с точки зрения

термодинамики процесса снятия пересыщения является энергетически более выгодной.

По результатам исследования влияния антискалантов 1-го типа марок АГАС и АКВА-ИС-2 на процесс кристаллизации сульфата кальция из пересыщенных растворов при соотношении CaSO_4 : А=1:1000 установлены минимальные концентрации антискалантов, обеспечивающие пороговый эффект при прочих равных условиях. Показано [38], что при одинаковой концентрации действующего вещества антискалантов - фосфорной кислоты (3.516 мг/л), установленной титрованием первой ступени диссоциации, эффективность антискаланта марки АКВА-ИС-2 на 33% выше, чем АГАС, что выражается в более длительном периоде нуклеации на кинетической кривой ($\ln\tau=1,5$ против $\ln\tau=1$).

С помощью исследования кинетики процесса кристаллизации сульфата кальция независимыми методами: комплексонометрическим, спектрофотометрическим и кондуктометрическим [39] при прочих равных условиях ($T=25^\circ\text{C}$, $C(\text{CaSO}_4) = 4X$) получены кинетические зависимости величины определяемого параметра (концентрации ионов кальция, показателей кислотности и электропроводности растворов) от времени. Установлен идентичный характер кинетических зависимостей, значения погрешности определения используемых методов находятся в пределах измерения приборов, не превышающей 2%, а сопоставление их значений свидетельствует о большей точности кондуктометрических методов анализа [40].

Поэтому представляло интерес исследование влияния антискаланта различного типа на процесс образования сульфата кальция и сравнение их эффективности.

Объекты и методы исследования

Реактивы: CaCl_2 б/в ч.д.а. (ТУ 6-09-4711-81 с изм. 1, $\geq 98.0\%$), Na_2SO_4 (ГОСТ 21458-75, 98.94%), NaCl х.ч. (ГОСТ 4233-77, 99.9%), лабораторная дистиллированная вода (6.0 мкСм/см); соль динатриевая этилендиамин-N, N, N', N'-тетрауксусной кислоты 2-водная (трилон Б) х.ч. (ГОСТ 10652-73, 99.8-100.2%), индикатор эриохром темно-синий.

Исходные растворы: $C(\text{CaCl}_2) = C(\text{Na}_2\text{SO}_4) = 1.0$ моль/л, приготовленные на лабораторной дистиллированной воде.

Рабочие растворы: $C(\text{CaCl}_2) = C(\text{Na}_2\text{SO}_4) = 0.1196$ моль/л, полученные путём разбавления исходных растворов $C(\text{CaCl}_2) = C(\text{Na}_2\text{SO}_4) = 1.0$ моль/л с последующим введением раствора $\text{NaCl} = 0.1$ моль/л для создания постоянного значения ионной силы.

Четыре группы модельных растворов (таблица 1) $\text{CaSO}_4\text{-NaCl-H}_2\text{O-A}$ заданной степени пересыщения ($4X$) $C(\text{CaSO}_4) = 0.0598$ моль/л относительно равновесной концентрации $C^*(\text{CaSO}_4) = 0.0145$ моль/л, полученные путём сливания в эквимольных соотношениях рабочих растворов $C(\text{CaCl}_2) = C(\text{Na}_2\text{SO}_4) = 0.1196$ моль/л с добавкой антискаланта (А1-А4), концентрации которых рекомендованы производителем [41,42, попов].

Группа 1 – с добавкой А1 марки РАА-F1 (табл.1). Средняя молекулярная масса 4000 а. е. м. [41-43].

Группа 2 – с добавкой А2 марки РАА-F2 с содержанием флуорофора около 0.5% масс (табл. 1). Молекулярная масса 4000 а.е.м. [44]. Третья – с добавкой А3 марки HEDP-F (табл. 1). Молекулярная масса 502.1 а.

е. м. [43]. Четвертая – с добавкой А4 марки PSI-NI. Молекулярная масса менее 3000, а. е. м. Схема получения флуоресцентного ингибитора на основе полисукцинимиды (табл.1) [13, 43].

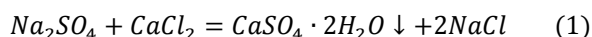
Таблица 1 - Схемы антискалантов А1-А4, в исследуемых модельных растворах сульфата кальция
Table 1 - Schemes of antiscalants A1-A4 in the studied model solutions of calcium sulfate

Обозначение антискалантов и их структурные схемы			
A1 [44]	A2 [11,41,45]	A3[44]	A4[44]

Приборы: аналитические весы марки “ВЛ-120М” (“Госметр”, РФ), точность: 0.0001 г; термостат “LT 300” (ЛИОР, РФ); иономер “Эксперт – 001” (Эконикс-эксперт, РФ); стеклянный электрод “ЭСЛ-43-07СР” и хлорсеребряный электрод сравнения “ЭВЛ-1М3.1”, (РУП “Гомельский завод измерительных приборов”, Беларусь); кондуктометр “Эксперт – 002”(«Эконикс-эксперт», РФ); комбинированный датчик электропроводности УЭП-П-С (“Эконикс-эксперт”, РФ); спектрометр с ИСП “iCAP 6300 Duo” (Thermo Scientific, Waltham, MA, USA).

Экспериментальная часть

Процесс образования сульфата кальция в холостом модельном растворе (0) описывается реакцией 1:



На рисунке 1 представлены кинетические зависимости процесса кристаллизации в модельном растворе четвертой группы $\text{CaSO}_4\text{-NaCl-H}_2\text{O-A4}$, иллюстрирующие $C(\text{CaSO}_4) = f(\tau)$, $\text{pH} = f(\tau)$, $\chi = f(\tau)$.

Концентрацию CaSO_4 определяли комплексонометрическим методом в аликвотах объемом 1 мл, отобранных из реакционного сосуда в заданные моменты времени. Значения удельной электропроводности и pH определяли с помощью датчиков непосредственно в реакционном объеме.

Продолжительность периода нуклеации определяли графическим методом по пересечению касательных, построенных к отдельным участкам кинетических зависимостей. Судя по значениям электрохимических параметров раствора (pH и χ), продолжительность периода нуклеации соответствует $\ln \tau = 5.5 \pm 0.1$, относительная ошибка не превышает 2%. Оценивая продолжительность периода нуклеации по текущей концентрации сульфата кальция в модель-

ном и холостом растворе, мы видим, что они отличаются почти в 2 раза и составляют, соответственно $\ln \tau = 5.4$ и $\ln \tau = 2.8$.

Следует отметить, что осадок в виде мелких включений белого цвета визуализировался на 30 минуте кинетического эксперимента, что согласуется с результатами комплексонометрического определения.

Большая продолжительность периода нуклеации, оцениваемая кондуктометрическими методами анализа раствора, на наш взгляд, может быть вызвана адгезией ингибитора на датчиках, что приводит к погрешности измерения значения удельной электропроводности и pH.

На рисунке 2 представлено влияние ингибиторов различного типа на процесс кристаллизации сульфата кальция из исследуемых растворов CaSO_4 при $T = 25^\circ\text{C}$.

Симбатный характер зависимостей 1 и 2 (рис. 2) объясняется одним типом антискаланта, отличающихся флуоресцентными метками, что не влияет на продолжительность периода нуклеации (τ_1 и τ_2). Оба ингибитора демонстрируют непревзойденную эффективность, обеспечивая стабильность пересыщенным растворам свыше 91 дня. Волнообразный характер зависимости концентрации CaSO_4 в модельном растворе 1, может быть вызван образованием комплексных соединений ингибитора не только с ионами Ca^{2+} , но и другими катионами примесей, неизбежно присутствующими в системе, и вызывающими флуктуации на стадии образования устойчивого зародыша.

На рисунке 3 представлено влияние температуры на процесс кристаллизации сульфата кальция $C(\text{CaSO}_4) = f(\tau)$ в модельных растворах второй группы при $T = 25^\circ\text{C}$, 35°C , 45°C и в холостом модельном растворе при $T = 35^\circ\text{C}$.

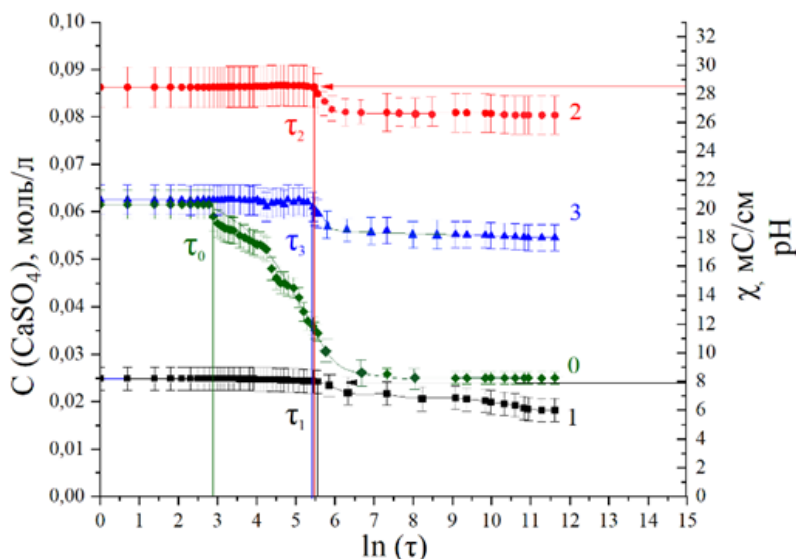


Рис. 1 – Аналитический контроль физико-химических параметров модельных растворов в процессе кристаллизации CaSO_4 при $T=25^\circ\text{C}$: 0 - $C(\text{CaSO}_4)$ в холостом модельном растворе; 1 – pH в модельном растворе 4 группы; 2 - удельная электропроводность в модельном растворе 4 группы; 3 - $C(\text{CaSO}_4)$ в модельном растворе 4 группы; τ_0 - время периода нуклеации кривой 0; τ_1 - время периода нуклеации кривой 1; τ_2 - время периода нуклеации кривой 2; τ_3 - время периода нуклеации кривой 3

Fig. 1 – Analytical control of the physico-chemical parameters of model solutions during the crystallization of CaSO_4 at $T=25^\circ\text{C}$: 0 - $C(\text{CaSO}_4)$ in an empty model solution; 1 – pH in a model solution of group 4; 2 - specific electrical conductivity in a model solution of group 4; 3 - $C(\text{CaSO}_4)$ in the model solution has 4 groups; τ_0 - time of the nucleation period of curve 0; τ_1 - time of the nucleation period of curve 1; τ_2 - time of the nucleation period of curve 2; τ_3 - time of the nucleation period of curve 3

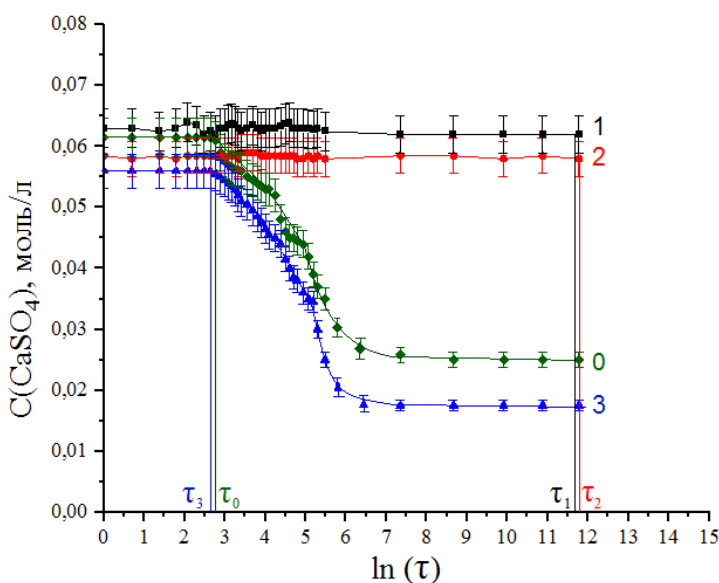


Рис. 2 – Кинетические зависимости процесса кристаллизации CaCO_4 при $T=25^\circ\text{C}$ из модельных растворов: 0- холостой; 1 - A1 (с PAA-F1- 10 мг/л); 2 - A2 (с PAA-F2 - 10 мг/л); 3 - A3 (с HEDP-F1- 10 мг/л); τ_0 - время периода нуклеации кривой 0; τ_1 - время периода нуклеации кривой 1; τ_2 - время периода нуклеации кривой 2; τ_3 - время периода нуклеации кривой 3

Fig. 2 – Kinetic dependences of the crystallization process of CaCO_4 at $T=25^\circ\text{C}$ from model solutions: 0- blank; 1 - A1 (with PAA-F1- 10 mg/l); 2 - A2 (with PAA-F2 - 10 mg/l); 3 - A3 (with HEDP-F1- 10 mg/l); τ_0 - the time of the nucleation period of curve 0; τ_1 - the time of the nucleation period of curve 1; τ_2 - the time of the nucleation period of curve 2; τ_3 - the time of the nucleation period of curve 3

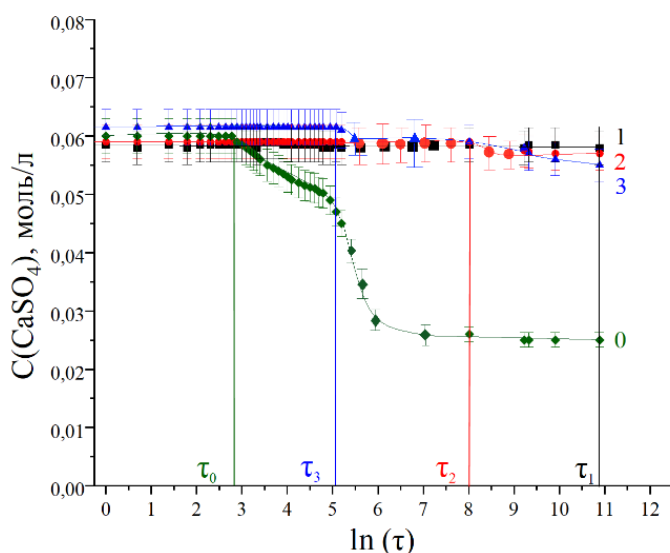


Рис. 3 – Кинетические зависимости процесса кристаллизации CaSO_4 из модельных растворов второй группы: 0 - кинетическая зависимость процесса кристаллизации CaSO_4 в холостом растворе (35°C); 1 - при температуре 25°C ; 2 - 35°C ; 3 - 45°C ; τ_0 - время периода нуклеации кривой 0; τ_1 - время периода нуклеации кривой 1; τ_2 - время периода нуклеации кривой 2; τ_3 - время периода нуклеации кривой 3

Fig. 3 – Kinetic dependences of the CaSO_4 crystallization process from model solutions of the second group: 0 - kinetic dependence of the CaSO_4 crystallization process in a blank solution (35°C); 1 - at a temperature of 25°C ; 2 - 35°C ; 3 - 45°C ; τ_0 - time of the nucleation period of curve 0; τ_1 - time of the nucleation period of curve 1; τ_2 - time of the nucleation period of curve 2; τ_3 - time of the nucleation period of curve 3

Поскольку сульфат кальция характеризуется обратной растворимостью, то с повышением температуры от 25°C до 45°C пересыщение снимается быстрее, период нуклеации сокращается $\ln \tau_1 = 10.88$, $\ln \tau_2 = 9.35$, $\ln \tau_3 = 5.19$, и равновесная концентрация $C^*(\text{CaSO}_4)$ составляет 0.058 моль/л, 0.057 моль/л, 0.055 моль/л, соответственно (рис. 3).

Важно отметить, что ингибитор A2 термически нестабилен и при повышении температуры до наблюдается снижению его эффективности вследствие разрушения полимерной структуры, и этот факт необходимо учитывать в конкретных приложениях.

На примере четырех групп модельных растворов (таблица 2) показаны исходные значения pH и концентрации ионов кальция в исследуемом температурном диапазоне ($T = 25^\circ\text{C} - 45^\circ\text{C}$).

Учитывая множество факторов, влияющих на исходные параметры исследуемых систем и сложный механизм процесса кристаллизации их действие может носить как синергетический, так и антагонистический характер. Поэтому представлялось целесообразным сравнить эффективность модельных растворов A1-A4 при прочих равных условиях

Таблица 2 – Сводные данные исследуемых модельных растворов

Table 2 – Summary data of the studied model solutions

№ р-ра	Тип ан- тиска- ланта	pH _{нач} , модельного раствора			C(Ca ²⁺) _{нач} , моль/л в модельном растворе			C(Ca ²⁺)*, моль/л в модельном растворе		
		T=25°C	T=35°C	T=45°C	T=25°C	T=35°C	T=45°C	T=25°C	T=35°C	T=45°C
0	-	7.60	7.70	8.10	0.0605	0.0590	0.0560	0.025	0.0250	0.0250
1	A1 PAA-F1	6.15	6.39	6.46	0.0610	0.0585	0.0530	0.059	0.0550	0.0542
2	A2 PAA-F2	5.50	5.60	5.69	0.0585	0.0550	0.0515	0.058	0.0570	0.0551
3	A3 HEDP-F1	7.60	7.70	8.01	0.0580	0.0510	0.0400	0.018	0.0160	0.0303
4	A4 PSI-NI	8.20	8.60	8.90	0.0615	0.0605	0.0590	0.0595	0.0560	0.0550

Из таблицы 2 видно, что с повышением температуры исходное значение pH модельных растворов увеличивается, а концентрация ионов кальция уменьшается, что согласуется с теорией кристаллизации. Между тем, в отличие от антискаланта A3, добавка

антискаланта A1, A2 и A4 приводит к изменению показателя pH модельных растворов в сравнении с холостым, что оказывает влияние на величину исходной и равновесной концентрации.

Заключение

Исследовано влияние четырех типов антискалантов с люминесцентной меткой на процесс образования сульфата кальция в модельных растворах. По результатам аналитического контроля процесса кристаллизации независимыми методами установлена большая (почти в 2 раза) продолжительность периода нуклеации, оцениваемая кондуктометрическими методами анализа раствора в сравнении с комплексонометрическим, что предположительно, объясняется адгезией ингибитора с добавкой люминофора на датчиках, вызывающей погрешность измерения значений удельной электропроводности и рН, а, следовательно, и ошибочной интерпретации полученных данных. Установлена термическая нестабильность люминофоров, приводящая к погрешности количественного анализа. Показано, что в рекомендуемых производителями дозах наибольшей эффективностью обладают антискаланты первой группы РАА с добавкой F1 и F2, обеспечивающих стабильность растворов четырехкратного пересыщения свыше 91 дня при $T=25^{\circ}\text{C}$. Повышение температуры приводит к существенному снижению их эффективности, что необходимо учитывать в каждом конкретном приложении. В целях рационального применения целесообразно снижение рекомендуемой производителями дозы антискалантов А1.

Литература

1. K. Sawada, *Pure & Appl. Chem.*, **69**, 5, 921-928 (1997). DOI:10.17303/jnsm.2014.105.
2. S.J. Gurgul, G. Seng, G.R. Williams, *Journal of Solid State Chemistry*, **305**, Article 122671 (2021). DOI: 10.1016/j.jssc.2021.122671.
3. ООО «ТюменьНефтеТехнологии», Научно-информационный блок (2024). [Электронный ресурс]: <https://www.tyumnt.ru/blog/ingibitoryi-soleotlozheniya-fosforsoderzhashhie-polimeryi> (дата обращения: 13.02.2025).
4. А.И. Волошин, В.Н. Гусаков, А.В. Фахреева, В.А. Докичев, *Нефтепромысловое дело*, **11**, 60-72 (2018). DOI: 10.30713/0207-2351-2018-11-60-72.
5. Z. Amjad, *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, **6**, 3, 276-290 (2017). DOI: 10.17675/2305-6894-2017-6-3-4.
6. W. Yu, D. Song, W. Chen, H. Yang, *Water Research*, **183**, Article 115985 (2020). DOI: 10.1016/j.watres.2020.115985.
7. А.С. Огнева, А.И. Волошин, Е.Ф. Смолянец, *Нефтепромысловое дело*, **618**, 6, 38-45 (2020). DOI: 30713/0207-2351-2020-6(618)-38-45.
8. Пат. RU 2315778 C2 (2015).
9. М. А. Полетаева, Ю. Ю. Мягкова, *II Всероссийская научно-практическая конференция Актуальные вопросы охраны окружающей среды и обеспечения экологической безопасности промышленных регионов* (Волгоград, Россия, Ноябрь 17-18, 2016). Волгоград, 2016. С. 131-133.
10. Н. Е. Пудова, Н.П. Какуркин, Е.А. Бывальцев, П.А. Афонин, *Вода: химия и экология*, **114**, 1-3, 120-126 (2018).
11. M. S. Oshchepkov, K. I. Popov, In *Desalination and Water Treatment*. IntechOpen, United Kingdom, London, 2018. P. 311-331. DOI:10.5772/intechopen.76218.
12. Polyimide [Электронный ресурс]: Википедия. Свободная энциклопедия. – Режим доступа: <https://de.wikipedia.org/wiki/Polyimide> (дата обращения: 13.02.2025).
13. T. Klein, R.-J. Moritz, R. Graupner, *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, **28**, 573-585 (2008). DOI:10.1002/14356007.l21_l01.
14. Н. П. Мелякова, Е. И. Григорьева, М. П. Петров, *Водоочистка*, **1**, 50-53 (2016).
15. [Электронный ресурс]: <https://www.etwinternational.ru/3-2-scale-inhibitor-37548.html> (дата обращения: 13.01.2025).
16. B. Zhang, D. Zhou, X. Lv, Y. Xu, Y. Cui, *Desalination*, **327**, 32-38 (2013). DOI: 10.1016/j.desal.2013.08.005.
17. E. Jalalvandi, A. Shavandi, *European Polymer Journal*, **109**, 43-54 (2018). DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2018.08.0.
18. L. Li, Y. Wang, Y. Sun, W. Yang, X. Yin, Y. Chen, Y. Liu, *Journal of Molecular Liquids*, **344**, Article 117730 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117730>.
19. X. Yuan, S. Dong, Q. Zheng, W. Yang, T. Huang, *Chemical Engineering Journal*, **389**, Article 124296 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124296>.
20. H. Wang, Y. Zhou, Q. Yao, S. Ma, W. Wu, W. Sun, *Desalination*, **340**, 1-10 (2014). DOI: 10.1016/j.desal.2014.02.015.
21. S. Zhang, J. Ding, D. Tian, M. Chang, X. Zhao, M. Lu, *Journal of Molecular Structure*, **1272**, Article 134157 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2022.134157>.
22. J. Feng, L. Gao, R. Wen, Y. Deng, X. Wu, S. Deng, *Desalination*, **345**, 72-76 (2014). DOI: 10.1016/j.desal.2014.04.019.
23. Z. Zhang, M. Lu, J. Liu, H. Chen, Q. Chen, B. Wang, *Materials Today Communications*, **25**, Article 101359 (2020). DOI: 10.1016/j.mtcomm.2020.101359.
24. H. Wang, Y. Zhou, G. Liu, J. Huang, Q. Yao, S. Ma, Z. Hu, *Desalination and Water Treatment*, **53**, 13, 3491-3498 (2013). DOI:10.1080/19443994.2013.873353.
25. L. Gao, T. Gao, J. Feng, S. Mo, Y. Guo, P. Guo, S. Pan, Y. Cheng, Q. Yang, *Desalination*, **582**, Article 117639 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117639>.
26. G. Liu, M. Xue, Y. Zhou, *Russ. J. Appl. Chem.*, **89**, 1861-1868 (2016). <https://doi.org/10.1134/S1070427216110185>.
27. М. С. Ощепкова, Г. Я. Рудакова, С. В. Ткаченко, В. Е. Ларченко, К. И. Попов, М. А. Тушева, *Водоподготовка и водно-химический режим, теплоэнергетика*, **68**, 5, 43-55 (2021). DOI: 10.1134/S0040363621040056.
28. M. Oshchepkov, S. Kamagurov, S. Tkachenko, A. Ryabova, K. Popov, *ChemNanoMat.*, **5**, 5, 586-592 (2019). <https://doi.org/10.1002/cnma.201800660>.
29. S. Xu, P. Wang, L. Xie, Y. Du, W. Zhang, *Molecules*, **29**, 10, 2163 (2024). DOI: 10.3390/molecules29102163.
30. П. А. Кекин. Дисс. к. т. н., ПХТУ им. Д. И. Менделеева, Россия, Москва, 2018, 119 с.
31. L. F. Greenlee, F. Testa, D. F. Lawler, B. D. Freeman, P. Moulin, *Water Research*, **44**, 8, 2672-2684 (2010). DOI: 10.1016/j.watres.2010.01.034.
32. J. Y. Choi, F. Kaufmann, A. Rahardianto, Y. Cohen, *Water Research*, **190**, Article 116766 (2021). DOI: 10.1016/j.watres.2020.116766.
33. Y. Hu, C. Chen, S. Liu, *Water Sci Technol.*, **85**, 5, 1500-1521 (2022). DOI: 10.2166/wst.2022.027. PMID: 35290228.
34. Y. Yin, N. Jeong, R. Minjarez, C. A. Robbins, K. H. Carlson, T. Tong, *Environmental Science & Technology*, **55**, 8, 5335-5346 (2021). DOI: 10.1021/acs.est.0c07190.
35. А. Э. Коваленко, *Материалы XXVII Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2020»* (Москва, Россия, Ноябрь 10-27, 2020), Перо [Электронное издание], Москва, 2020. С.1187.
36. M. Oshchepkov, K. Popov, A. Kovalenko, A. Redchuk, J. Dikareva, I. Pochitalkina, *Minerals*, **10**, 1083 (2020). DOI: 10.3390/min10121083.

37. А.Э. Коваленко, М.С. Ощепков, Ю.М. Дикарёва, С.В. Ткаченко, *Материалы XXVIII Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2021»* (Москва, Россия, Апрель 12-13, 2021), Перо [Электронное издание], Москва, 2021. С.932.
38. А.Э. Коваленко, М.В. Матрюков, Д.Н. Горбачева, П.А. Кекин, И.А. Почиталкина, *МКХТ Успехи в химии и химической технологии* (Москва, Россия, Октябрь 18-21, 2016), РХТУ им. Д. И. Менделеева, Москва, 2016, **30**, 3, 172. С. 111-112 (2016).
39. ГОСТ 10398-76-2016, *Реактивы и особо чистые вещества. Комплексонометрический метод определения содержания основного вещества*. Дата введения 30.06.1977, 18 С.
40. А.Э. Коваленко, И.А. Почиталкина, *Семнадцатый Международный Конгресс молодых ученых по химии и химической технологии «МКХТ-2021» (The XVII United Congress of Chemical Technology of Youth «UCChT-2021»)* (Москва, Россия, Октябрь 26-29, 2021), РХТУ им. Д. И. Менделеева, Москва, 2021, **35**, 6. С.47
41. К. Попов, М. Oshchepkov, S. Kamagurov, S. Tkachenko, J. Dikareva, G. Rudakova, *J. Applied Polymer Science*, **134**, 26, 45017 (2017). <https://doi.org/10.1002/app.45017>
42. M. Oshchepkov, V. Golovesov, A. Ryabova, S. Tkachenko, A. Redchuk, H. Rönkkömäki, G. Rudakova, A. Pervov, K. Popov, *Separation and Purification Technology*, **255**, 1383-5866 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117382>
43. [Электронный ресурс]: <https://www.sigmaaldrich.com/RU/en/product/aldrich/937185> (дата обращения: 10.12.2024)
44. M. Oshchepkov, V. Golovesov, A. Ryabova, S. Frolova, S. Tkachenko, S. Kamagurov, G. Rudakova, K. Popov, *Crystals*, **10**, 992 (2020). DOI:10.3390/cryst10110992
45. M. Oshchepkov, K. Popov, In *NACE Corrosion*, Article NACE-2021-16534. NACE, USA, Houston, 2021. P. D041S017R005.
46. M. S. Oshchepkov, K. I. Popov, In *Desalination and Water Treatment*. IntechOpen, United Kingdom, London, 2018. P. 311-331. DOI:10.5772/intechopen.76218.
47. Polyimide [Electronic resource]: Wikipedia. The free encyclopedia. – Access mode: <https://de.wikipedia.org/wiki/Polyimide> (date of access: 13.02.2025).
48. T. Klein, R.-J. Moritz, R. Graupner, *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, **28**, 573-585 (2008). DOI:10.1002/14356007.l21_l01.
49. N. P. Melyakova, E. I. Grigorieva, M. R. Petrov, *Vodoochistka*, **1**, 50-53 (2016).
50. [Electronic resource]: <https://www.etwinternational.ru/3-2-scale-inhibitor-37548.html> (date of access: 01/13/2025).
51. B. Zhang, D. Zhou, X. Lv, Y. Xu, Y. Cui, *Desalination*, **327**, 32-38 (2013). DOI: 10.1016/j.desal.2013.08.005.
52. E. Jalalvandi, A. Shavandi, *European Polymer Journal*, **109**, 43-54 (2018). DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2018.08.0.
53. L. Li, Y. Wang, Y. Sun, W. Yang, X. Yin, Y. Chen, Y. Liu, *Journal of Molecular Liquids*, **344**, Article 117730 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117730>.
54. X. Yuan, S. Dong, Q. Zheng, W. Yang, T. Huang, *Chemical Engineering Journal*, **389**, Article 124296 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124296>.
55. H. Wang, Y. Zhou, Q. Yao, S. Ma, W. Wu, W. Sun, *Desalination*, **340**, 1-10 (2014). DOI: 10.1016/j.desal.2014.02.015.
56. S. Zhang, J. Ding, D. Tian, M. Chang, X. Zhao, M. Lu, *Journal of Molecular Structure*, **1272**, Article 134157 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2022.134157>.
57. J. Feng, L. Gao, R. Wen, Y. Deng, X. Wu, S. Deng, *Desalination*, **345**, 72-76 (2014). DOI: 10.1016/j.desal.2014.04.019.
58. Z. Zhang, M. Lu, J. Liu, H. Chen, Q. Chen, B. Wang, *Materials Today Communications*, **25**, Article 101359 (2020). DOI: 10.1016/j.mtcomm.2020.101359.
59. H. Wang, Y. Zhou, G. Liu, J. Huang, Q. Yao, S. Ma, Z. Hu, *Desalination and Water Treatment*, **53**, 13, 3491-3498 (2013). DOI:10.1080/19443994.2013.873353.
60. L. Gao, T. Gao, J. Feng, S. Mo, Y. Guo, P. Guo, S. Pan, Y. Cheng, Q. Yang, *Desalination*, **582**, Article 117639 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117639>.
61. G. Liu, M. Xue, Y. Zhou, *Russ. J. Appl. Chem.*, **89**, 1861-1868 (2016). <https://doi.org/10.1134/S1070427216110185>.
62. M. S. Oshchepkova, G. Ya. Rudakova, S. V. Tkachenko, V. E. Larchenko, K. I. Popov, M. A. Tusheva, *Water Treatment and Water Chemistry*, Thermal Power Engineering, **68**, 5, 43-55 (2021). DOI: 10.1134/S0040363621040056.
63. M. Oshchepkov, S. Kamagurov, S. Tkachenko, A. Ryabova, K. Popov, *ChemNanoMat.*, **5**, 5, 586-592 (2019). <https://doi.org/10.1002/cnma.201800660>.
64. S. Xu, P. Wang, L. Xie, Y. Du, W. Zhang, *Molecules*, **29**, 10, 2163 (2024). DOI: 10.3390/molecules29102163.
65. P. A. Kekin. Diss. Ph.D., Russian Chemical Technical University named after. D. I. Mendeleeva, Russia, Moscow, 2018, 119 p. L. F. Greenlee, F. Testa, D. F. Lawler, B. D. Freeman, P. Moulin, *Water Research*, **44**, 8, 2672-2684 (2010). DOI: 10.1016/j.watres.2010.01.034.
66. J. Y. Choi, F. Kaufmann, A. Rahardianto, Y. Cohen, *Water Research*, **190**, Article 116766 (2021). DOI: 10.1016/j.watres.2020.116766.
67. Y. Hu, C. Chen, S. Liu, *Water Sci Technol.*, **85**, 5, 1500-1521 (2022). DOI: 10.2166/wst.2022.027. PMID: 35290228.
68. Y. Yin, N. Jeong, R. Minjarez, C. A. Robbins, K. H. Carlson, T. Tong, *Environmental Science & Technology*, **55**, 8, 5335-5346 (2021). DOI: 10.1021/acs.est.0c07190.
69. Y. Yin, N. Jeong, R. Minjarez, C. A. Robbins, K. H. Carlson, T. Tong, *Environmental Science & Technology*, **55**, 8, 5335-5346 (2021). DOI: 10.1021/acs.est.0c07190.

References

1. K. Sawada, *Pure & Appl. Chem.*, **69**, 5, 921-928 (1997). DOI:10.17303/jnsm.2014.105.
2. S.J. Gurgul, G. Seng, G.R. Williams, *Journal of Solid State Chemistry*, **305**, Article 122671 (2021). DOI: 10.1016/j.jssc.2021.122671.
- 3.3. ООО TyumenNefteTekhnologii, Scientific and Information Block (2024). [Electronic resource]: <https://www.tyumnt.ru/blog/ingibitoryi-soleotlozheniya-fosforsoderzhashhie-polimeryi> (date of access: 13.02.2025).
- 4.4.A.I. Voloshin, V.N. Gusakov, A.V. Fakhreeva, V.A. Dokichev, *Neftepromyslovoe delo*, **11**, 60-72 (2018). DOI: 10.30713/0207-2351-2018-11-60-72.
5. Z. Amjad, *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, **6**, 3, 276-290 (2017). DOI: 10.17675/2305-6894-2017-6-3.
6. W. Yu, D. Song, W. Chen, H. Yang, *Water Research*, **183**, Article 115985 (2020). DOI: 10.1016/j.watres.2020.115985.
7. A.S. Ogneva, A. Voloshin, E.F. Smolyanets, M.S. Antonov, *Oilfield Engineering*, **618**, 6, 38-45 (2020). DOI: 10.30713/0207-2351-2020-6(618)-38-46.
8. Pat. RU 2315778 C2 (2015).
9. M. A. Poletaeva, Yu. Yu. Myagkova, *II All-Russian scientific and practical conference Actual issues of environmental protection and ensuring environmental safety of industrial regions* (Volgograd, Russia, November 17-18, 2016). VolSU, Volgograd, 2016. P. 131-133.
10. N. E. Pudova, N.P. Kakurkin, E.A. Byvaltsev, P.A. Afonin, *Water: chemistry and ecology*, **114**, 1-3, 120-126 (2018).

24. A. E. Kovalenko, Proceedings of the XXVII International Scientific Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists "Lomonosov-2020" (Moscow, Russia, November 10-27, 2020), Pero [Electronic publication], Moscow, 2020. P.1187.
25. M. Oshchepkov, K. Popov, A. Kovalenko, A. Redchuk, J. Dikareva, I. Pochitalkina, *Minerals*, **10**, 1083 (2020). DOI: 10.3390/min10121083.
26. A.E. Kovalenko, M.S. Oshchepkov, Yu.M. Dikareva, S.V. Tkachenko, *Proceedings of the XXVIII International Scientific Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists "Lomonosov-2021"* (Moscow, Russia, April 12-13, 2021), Pero [Electronic publication], Moscow, 2021. P.932.
27. A.E. Kovalenko, M.V. Mastryukov, D.N. Gorbacheva, P.A. Kekin, I.A. Pochitalkina, *MKHT Advances in Chemistry and Chemical Technology* (Moscow, Russia, October 18-21, 2016), D. I. Mendeleyev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, 2016, **30**, 3, 172. P. 111-112 (2016).
28. GOST 10398-76-2016, *Reagents and highly pure substances. Complexometric method for determining the content of the main substance. Date of introduction 30.06.1977*, 18 p.
29. A.E. Kovalenko, I.A. Pochitalkina, *The XVII United Congress of Chemical Technology of Youth «UCChT-2021»* (Moscow, Russia, October 26-29, 2021), Mendeleyev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, 2021, **35**, 6. P.4.
30. K. Popov, M. Oshchepkov, S. Kamagurov, S. Tkachenko, J. Dikareva, G. Rudakova, *J. Applied Polymer Science*, **134**, 26, 45017 (2017). <https://doi.org/10.1002/app.45017>.
31. M. Oshchepkov, V. Golovesov, A. Ryabova, S. Tkachenko, A. Redchuk, H. Rönkkömäki, G. Rudakova, A. Pervov, K. Popov, *Separation and Purification Technology*, **255**, 1383-5866 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117382>
32. [Electronic resource]: <https://www.sigmaaldrich.com/RU/en/product/aldrich/937185> (date of access: 10.12.2024).
33. M. Oshchepkov, V. Golovesov, A. Ryabova, S. Frolova, S. Tkachenko, S. Kamagurov, G. Rudakova, K. Popov, *Crystals*, **10**, 992 (2020). DOI:10.3390/cryst10110992.
34. M. Oshchepkov, K. Popov, In *NACE Corrosion*, Article NACE-2021-16534. NACE, USA, Houston, 2021. P. D041S017R005.

© **И. А. Почиталкина** – д-р хим. наук, проф., доцент кафедры Технологии неорганических веществ и электрохимических процессов (ТНВ и ЭП), Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева (РХТУ им. Д.И. Менделеева), Москва, Россия, pochitalkina@list.ru; **А. Э. Коваленко** - аспирантка кафедры ТНВ и ЭП, РХТУ им. Д.И. Менделеева, mississhkatulka@yandex.ru.

© **I. A. Pochitalkina** – Doctor of Sciences (Chemical Sci.), Professor, Associate Professor of the Department of Technology of Inorganic Substances and Electrochemical Processes (TIS&EP), D.I. Mendeleyev University of Chemical Technology of Russia (D.I. Mendeleyev UCTR), Moscow, Russia, pochitalkina@list.ru; **A. E. Kovalenko** – PhD-Student of the TIS&EP department of Technology of Inorganic Substances and Electrochemical Processes, D.I. Mendeleyev UCTR, mississhkatulka@yandex.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 20.04.25.

Дата принятия рукописи в печать – 16.06.25.